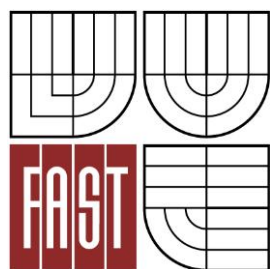




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV STAVEBNÍHO ZKUŠEBNICTVÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF BUILDING TESTING

MĚŘENÍ DEFORMACÍ PŘI ZATĚŽOVACÍCH ZKOUŠKÁCH MOSTNÍCH KONSTRUKCÍ

MEASUREMENT OF DEFORMATION OF BRIDGES LOADING TESTS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

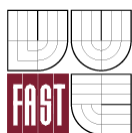
Bc. MIROSLAV ZLÁMAL

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. PETR ŽÍTT

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607T009 Konstrukce a dopravní stavby
Pracoviště	Ústav stavebního zkušebnictví

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Diplomant	Bc. MIROSLAV ZLÁMAL
Název	Měření deformací při zatěžovacích zkouškách mostních konstrukcí
Vedoucí diplomové práce	Ing. Petr Žitt
Datum zadání diplomové práce	31. 3. 2012
Datum odevzdání diplomové práce	11. 1. 2013
V Brně dne 31. 3. 2012	

.....
prof. Ing. Leonard Hobst, CSc.
Vedoucí ústavu

.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

Podklady a literatura

- [1] ČSN 73 6209 Zatěžovací zkoušky mostů
- [1] Jiří Stráský, Betonové mosty, 2001
- [2] ČSN 73 6200 Mostní názvosloví
- [3] ČSN 73 6206 Navrhování betonových a železobetonových mostních konstrukcí
- [4] ČSN EN 1992-2 Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí - Část 2: Betonové mosty - Navrhování a konstrukční zásady
- [5] ČSN 73 6221 Prohlídky mostů

Zásady pro vypracování

Ověření možného využití různých typů vodících lanek (invarový drát, běžný drát, silon, kevlar, uhlík atd.) pro měření deformací konstrukcí v laboratorních a terénních podmínkách (především mostní konstrukce). Návrh a popis metody tohoto způsobu měření deformací včetně vyhodnocení vhodnosti použití jednotlivých materiálů s ohledem na podmínky při provádění měření (vliv teplot, vlhkosti, síly větru, zatížení od protizávaží atd.) Návrh měření deformací vybranými typy závěsů a jeho provedení při zatěžovací zkoušce mostu (popř. snímání přejezdu od nadměrné přepravy) včetně následného vyhodnocení.

Předepsané přílohy

.....

Ing. Petr Žitt
Vedoucí diplomové práce

Bibliografická citace VŠKP

ZLÁMAL, Miroslav. *Měření deformací při zatěžovacích zkouškách mostních konstrukcí*. Brno, 2012. 86 s., 2 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavebního zkušebnictví. Vedoucí práce Ing. Petr Žítt.

Abstrakt v českém jazyce

Předmětem předkládané diplomové práce je rozbor procesu měření deformací při zatěžovacích zkouškách mostních konstrukcí a jejich následné vyhodnocení. Práce si klade za cíl popsat běžně používané měřičské metody, jejich principy a úskalí a také najít využití v metodách moderních. Hlavním předpokladem práce je vyřešit problematiku závěsných drátů, tedy na základě laboratorního měření najít vhodné alternativy k dosud nejpoužívanějšímu drátu ocelovému.

První část práce je zaměřena na teoretické předpoklady pro zatěžovací zkoušky mostních konstrukcí a je založena na normě ČSN 73 6209 včetně popisu měřičských metod. Druhá část práce je zaměřena na vyhodnocení konkrétní zatěžovací zkoušky a zpracování laboratorního experimentu.

Abstrakt v anglickém jazyce

The topic of this diploma thesis is an analysis of a process of deformation measurements performed during bridge structure load tests and their following evaluation. The aim of this thesis is to describe commonly used methods of measurement, their principles and difficulties, and to find ways of usage in modern methods. The main point of the thesis is to solve the problematic of suspension wire – to find through laboratory measurement suitable alternatives to so far most commonly used steel wire.

The first part of the thesis is focused on theoretical hypotheses for load testing of bridge structures and is based on the ČSN 73 6209 norm, including description of the measurement methods. The next part is focused on the evaluation of particular bridge load test and practical evaluation of the laboratory experiment.

Klíčová slova v českém a anglickém jazyce

- Zatěžovací zkouška – Load test
- Měřičské metody – Methods of measurement
- Mostní konstrukce – Bridge
- Závěsný drát – Suspension wire

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 19. 9. 2012

.....
podpis autora
Miroslav Zlámal

Poděkování:

Tímto bych chtěl poděkovat především vedoucímu práce panu Ing. Petrovi Žíttovi, za jeho odborné vedení a obětavou pomoc při zpracování diplomové práce. Dále pak všem, u kterých jsem našel cenné rady a důležité názory pro řešení problematiky práce.

Obsah

1. Úvod.....	10
2. Zatěžovací zkoušky mostních konstrukcí	11
2.1 Požadavky na zatěžovací zkoušky	11
2.2 Druhy a účel zatěžovacích zkoušek	11
2.3 Příprava zatěžovací zkoušky	13
2.4 Průzkumy mostů pozemních komunikací	14
2.5 Realizace zatěžovací zkoušky	17
2.5.1 Druhy zkušebního zatížení	18
2.5.2 Velikost zkušebního zatížení.....	21
2.5.3 Uspořádání zkušebního zatížení.....	22
2.5.4 Obecný zatěžovací postup.....	22
2.6 Vyhodnocení zatěžovací zkoušky	24
2.6.1 Posouzení únosnosti	24
2.6.2 Posouzení spolehlivosti	27
2.8 Zkušební protokol a zpráva o zatěžovací zkoušce	27
3. Měření přetvárných veličin	29
3.1 Měření průhybů a poklesů podpor	30
3.1.1 Geodetické metody.....	31
3.1.2 Mechanické metody	36
3.1.3 Elektronické metody	38
3.1.4 Optické metody	40
3.2 Měření prostorových deformací konstrukce	42
3.3 Měření poměrných deformací konstrukce.....	43
3.3.1 Mechanické tenzometry	44
3.3.2 Tenzometry strunové.....	45
3.3.3 Tenzometry elektronické.....	46
4. Vyhodnocení zatěžovací zkoušky	49
4.1 Popis konstrukce	49
4.2 Popis měření	49
4.3 Zatěžovací sestava.....	51
4.3.1 Rozmístění břemen při jednotlivých zatěžovacích stavech	51
4.4 Vyhodnocení zatěžovací zkoušky	52
4.4.1 ZS1	52

4.4.2 ZS2	53
4.4.3 ZS3	54
4.5 Shrnutí zatěžovací zkoušky	55
5. Problematika závěsných drátů	56
5.1 Faktor chyby závěsných drátů	56
5.1.1 Koeficient teplotní roztažnosti	57
5.1.2 Výpočet teoretické chyby	58
5.2 Reálné chování závěsných drátů	59
5.2.1 Invar	60
5.2.2 Průmyslové šicí materiály	62
5.2.3 Nylon	65
5.2.4 Rybářský vlasec WHIPLASH	67
5.2.5 Ocelový drát	69
5.2.6 Obyčejné ocelové lanko	71
5.2.7 Rybářský návazec NIROFLEX	72
5.2.8 Rybářský návazec Target Line	74
5.2.9 Rybářský návazec Micro Plus	76
5.2.10 Faktor chyby experimentu	78
5.2.11 Vyhodnocení experimentu	80
6. Závěr	82
7. Použitá literatura	84
8. Příloha 1 – grafický výstup měření č. 1	87
9. Příloha 2 – grafický výstup měření č. 2	88

1. Úvod

Mostní konstrukce patří mezi nejkomplexnější díla z oblasti stavební činnosti. Vzhledem k jejich konstrukční náročnosti, vytiženosti a logistické nezbytnosti jsou na ně ze všech stran kladeny nadstandartní nároky a to od počátku výroby až do konce jejich životnosti. Je třeba si uvědomit, že nezáleží na typu mostu, druhu konstrukce nebo skladbě materiálu, v každém případě funkčnost a spolehlivost musí být prokazatelně dodržena. Bohužel nelze vždy spolehlivost prokázat výpočty či modelováním a vstupují nám tak do realizačního procesu zatěžovací zkoušky. Ve své podstatě jde o jediný způsob, jak lze objektivně demonstrovat skutečné chování konstrukce při extrémních podmínkách v reálném či zmenšeném měřítku. Lze jimi tedy ověřovat teoretické předpoklady chování konstrukce v laboratoři nebo po jejím vybudování in-situ a následně pak v průběhu její životnosti. Každá z těchto třech situací však nese svá specifika, díky kterým se postup zkoušení a vyhodnocení zásadně mění a jednotlivé zatěžovací zkoušky tak získávají punc originality.

V případě laboratorních zatěžovacích zkoušek je důležitým faktorem vhodně zvolené měřítko modelu tak, aby měl výsledek vypovídající hodnotu pro účel zkoušení. U nově vybudovaných mostních konstrukcí je běžná realizace zkoušky ještě před uvedením mostu do provozu, což je zásadní výhodou celého zkoušení konstrukce. V případě stávajících mostních konstrukcí je často jedinou možností vyhodnocení zatěžovací zkoušky na základě nadměrného přejezdu. Jedním z cílů práce je rozebrat tři výše uvedené situace, jejich závazné předpisy a konkrétní příklady vyhodnocení zkoušek.

Veškerý průběh zatěžovací zkoušky, včetně jejího výstupu, se odvíjí od naměřených hodnot deformací. Vysoká přesnost a logické navržení měřených veličin tedy vstupuje do vyhodnocení velice zásadním způsobem a je třeba na tyto faktory brát zřetel. Pochopitelně do procesu realizace zatěžovací zkoušky vstupují nepříznivé elementy, jako jsou povětrnostní vlivy, prostorové dispozice a řada různých nepřesností měření. Vzniká tak snaha eliminovat veškeré odchylky od skutečných hodnot a zároveň zvolit jednoduchý a efektivní způsob měření deformací.

Odečet svislých deformací běžně probíhá pomocí nivelačních metod a měření pohybu závěsného drátu. Část této práce je zaměřena na zkoumání vhodnosti materiálů použitých závěsných drátů včetně analýzy jejich chování v laboratorních podmínkách. Cílem je najít alternativy pro dosud nejvíce používané dráty z (ocel, v ideálním případě invar) a také porovnat jejich vhodnost aplikace v závislosti na okolních vlivech.

2. Zatěžovací zkoušky mostních konstrukcí

2.1 Požadavky na zatěžovací zkoušky

Veškeré zatěžovací zkoušky na mostních objektech slouží především k ověření spolehlivosti zkoušené konstrukce. Výchozí podmínky spolehlivosti jsou dány výpočtem dle norem pro navrhování. Vzhledem k náročnosti provedení mostních konstrukcí mohou zatěžovací zkoušky provádět pouze takové organizace, které mají příslušnou akreditaci či pověření od ústředního orgánu státní správy ve věcech dopravy. Zkušebny či laboratoře pověřené provedením zatěžovacích zkoušek mají také na starosti zajištění bezpečnosti osob a majetku v průběhu realizace zkoušky. V případě zkoušek in-situ zajišťuje bezpečnost osob a majetku objednatel, dle pokynů laboratoře. [1][2]

2.2 Druhy a účel zatěžovacích zkoušek

Základním dělením zatěžovacích zkoušek podle způsobu zkoušení jsou zkoušky statické a dynamické. Ve své podstatě jde o rozdílný účinek zatížení, tedy statický nebo dynamický, z čehož plyne různé požadované přetvárné veličiny a odlišné hodnocení zatěžovacích zkoušek. [1]

Zatěžovací zkoušky mostních konstrukcí lze také rozdělit dle typu běžného namáhání konstrukce na silniční, železniční a lávky. V každém z případů rozhodují jiné hodnoty přetvárných veličin a realizací zkušebního zatížení se zkouška podstatně mění.



Obr. 2.1 Ilustrace zatěžovací zkoušky mostní konstrukce:
silniční – Annín, železniční – Ostrov nad Ohří [10]

Dále lze rozdělit zatěžovací zkoušky mostních konstrukcí podle stáří konstrukce. Vznikají tak zkoušky modelové, realizované ještě před dokončením stavby v laboratoři, zkoušky průkazní, které jsou realizovány na konstrukcích před uvedením do provozu a zkoušky z důvodu pochybnosti spolehlivosti u stávajících mostních konstrukcí. V každém případě je třeba řešit rozdílnou problematiku zatěžování a hodnocení zkoušky.

Dělení zatěžovacích zkoušek mostních konstrukcí dle účelu vyplývá z požadavků na zkoušenou konstrukci a často vzniká snaha získat z jedné zatěžovací zkoušky co největší množství parametrů, po jejich vyhodnocení se uvedené účely vzájemně prolínají. Zatěžovací zkoušky se obvykle provádějí, je-li třeba:

- ověřit statické či dynamické funkce konstrukce;
- prokázat spolehlivost konstrukce v mezních stavech použitelnosti;
- doložit reálnost výpočtových modelů a vstupních charakteristik výpočtu;
- posoudit spolehlivost a jakost mostu pokud je tento požadavek předepsán v systému zajišťování spolehlivosti a jakosti;
- vyvrátit pochybnosti o shodě provedení konstrukce s požadavky návrhu;
- zjistit potřebné parametry k výpočtu, nelze-li je bezpečně získat jinak.[1]

Požadavek na realizaci zatěžovací zkoušky může vzejít také ze strany orgánu státní správy rozhodujícím o uvedení mostu do provozu, čili po vybudování konstrukce. Často se také provádějí na základě předpisu vedoucího hlavní prohlídky nebo investora po dohodě se správcem objektu. Zatěžovací zkouška může být i součástí návrhu v projektové dokumentaci, především u mostů neobvyklých statických soustav a geometrických dispozic. Mohou také vzniknout pochybnosti u konstrukcí s užitím nových materiálů a technologií, u mostů rekonstruovaných, kde bylo radikálně zasaženo do nosného systému a také u mostních provizorií.[1]

V průběhu životnosti konstrukce může dojít ke změnám dynamických vlastností, jako jsou vlastní frekvence, tvary kmitání, útlumu apod. U konstrukcí, kde se tyto změny předpokládají, je třeba provést kontrolu spolehlivosti na základě rozdílu původních a stávajících charakteristik pomocí dynamické zatěžovací zkoušky. [1] Práce bude zaměřena především na zatěžovací zkoušky statické.

2.3 Příprava zatěžovací zkoušky

Podkladem ke každé zatěžovací zkoušce je předem zpracovaný protokol, který by měl obsahovat všechny údaje týkající se předpokládané přípravy a realizace zkoušky. Jedná se především o:

- účel a rozsah zkoušky schválený investorem či správcem mostního objektu;
- základní údaje o skutečném stavu objektu, včetně okolností nesouvisejících s návrhem;
- nezbytné podklady k posouzení konstrukce z hlediska mezních stavů únosnosti a použitelnosti, včetně jejich kontroly;
- veškeré údaje o zatěžování konstrukce při zkoušce, tj. druh a intenzita zatížení, zatěžovací stupně a délka působení zkušebního zatížení, rozmístění zkušebního zatížení a pořadí jednotlivých zatěžovacích stupňů
- údaje o měřených veličinách, způsoby jejich snímání včetně přenosu a zpracování, údaje o měřicích a vyhodnocovacích přístrojích a jejich rozmístění na konstrukci;
- stanovení způsobu hodnocení výsledků v závislosti na druhu a účelu zatěžovací zkoušky;
- způsob a důvod výběru reprezentantů;
- popis prací souvisejících se zatěžovací zkouškou, tj. přípravné a pomocné práce včetně požadavků na objednatele;
- předpokládaný harmonogram zkušebních prací, plány výluk a odstávek, termín předání předběžné a konečné zprávy. [1]

U mostních objektů, které mají opakující se geometrii konstrukce vyrobenou za stejných podmínek, zpravidla více než 3 krát, lze ujednat pouze omezený počet reprezentantů.

Každou statickou zatěžovací zkoušku mostní konstrukce předchází hlavní prohlídka dle ČSN 73 6221 Prohlídky mostů pozemních komunikací nebo prohlídka dle platných drážních předpisů. V rámci hlavní prohlídky se výškově zaměří podpěry a středy rozpětí polí mostní konstrukce na obou stranách podélné osy a všechny pozorované body dle ČSN 73 6221. U mostů drážních se provede kontrola prostorového uspořádání koleje vzhledem k ose mostu a jeho hlavní nosné konstrukci. V případě dynamických zatěžovacích zkoušek je třeba provést celkové zaměření pojížděného povrchu konstrukce a to i v přiměřených vzdálenostech před a za mostem. [1]

Obecně však zatěžovací zkoušku předchází prohlídka všech částí konstrukce, ověření zda skutečný stav odpovídá projektové dokumentaci a především kontrola geometrických rozměrů, odchylek, kvality materiálů a celkové jakosti zhotovené konstrukce.

Před zahájením práce je třeba přichystat pracoviště tak, aby byla dodržena bezpečnost práce a zatěžovací zkouška proběhla plynule a bez komplikací. V případě zkoušek in-situ mohou vzejít požadavky na vedení elektrického proudu, osvětlení, zřízení montážních lávek apod., které budou zajištěny objednatelem zkoušky. Příprava zatěžovací zkoušky se tak může protáhnout do nepříjemných časových závěrů.

2.4 Průzkumy mostů pozemních komunikací

Jak již bylo uvedeno, před realizací zatěžovací zkoušky mostu je třeba provést hlavní prohlídku mostu dle ČSN 736221. Hlavní prohlídky mostů jsou mimo jiné předepsány v určitých intervalech, v závislosti na typu konstrukce mostu a klasifikačním stupni stavu mostu, např. nejčastěji je třeba prohlížet mosty dřevěné a prozatímní. Za dodržování hlavních prohlídek mostu v daných intervalech zodpovídá správce mostu, tyto prohlídky mohou korespondovat s realizací zatěžovací zkoušky. Obvykle se zatěžovací zkouška provádí po zahájení první hlavní prohlídky, tedy pokud prohlídka jednoznačně směřuje ke kladným závěrům ohledně stability mostu.

Náplní hlavní prohlídky je ověření všech částí mostní konstrukce z hlediska jejich únosnosti a spolehlivosti. Většina prohlídek je prováděna na základě vizuálního hodnocení stavu části konstrukce a následného zatřídění do jednotlivých stupňů jakosti, dále se pak provádí porovnání s předchozí prohlídkou. Velká pozornost by měla být věnována vadám, jež byly zjištěny na poslední prohlídce a také prvkům a částem mostu, které se podrobily nějakému druhu rekonstrukce či jinému stavebnímu zásahu. Je třeba brát především ohled na funkce a účel jednotlivých prvků konstrukce a také na jejich materiálovém složení. Prohlídku by měl provádět specialista, včetně přizvaných odborných orgánů, správců či vlastníků mostu a projektanta. [3]

Účelem hlavní prohlídky mostu je dokument formy protokolu, který jasně definuje stav konstrukce tak, aby bylo možné určit požadavky údržbových prací, navrhnout další podrobný diagnostický průzkum, popřípadě zajistit neodkladná opatření (uzavření mostu, náhrada mostu, výluka). [3]

První hlavní prohlídka mostu slouží především k posouzení připravenosti konstrukce k bezpečnému provozu a určení jakosti a úplnosti provedených prací. Porovnávají se údaje ze schválené projektové dokumentace se skutečným provedením, včetně ověření zatížitel-

nosti mostu (zde vzniká požadavek na zatěžovací zkoušku). Při zjištění závad a nedodělků se rozhodne o způsobu a termínu jejich odstranění v návrhu opatření, popřípadě se provede nová zatěžovací zkouška. [3]

Při dalších prohlídkách mostu je třeba věnovat pozornost nejčastějším poruchám nosné konstrukce a spodní stavby, jedná se především o korozi výztuže vlivem nedostatečných ochranných vlastností betonu, způsobených karbonatací krycí vrstvy. Často se také vyskytují poruchy ocelových částí konstrukce, jako jsou nosné prvky, ložiska, mostní závěry, odvodňovací zařízení. Poškození ocelových částí může být způsobeno nedostatečnou jakostí z výroby, špatným technologickým postupem při montáži nebo již výše uvedenou korozí. [3]

Důležitým činitelem při hledání příčiny problému je voda. Často dochází k nevhodnému návržení odvodňovacího systému konstrukce a také k jeho nedostatečnému provedení. Průzkumy mostních konstrukcí je vhodné dělat v návaznosti na významnější deštivé období tak, aby bylo patrné, kam voda proudí či prosakuje.

Norma ČSN 73 6221 poskytuje výčet vad, na které je třeba se při průzkumech nejvíce zaměřit. Jedná se především o:

- zatékání do nosné konstrukce, jejich dutin, na spodní stavbu, způsoby odvodnění;
- degradace betonu, oslabení tlačných betonových částí;
- nedostatečná tloušťka krycí vrstvy betonu, její odpadávání, trhliny;
- zatékání do kabelových kanálků a kotev předpínací výztuže;
- koroze a oslabení výztuže;
- trhliny v oceli, svarech, spojích, vady ocelového materiálu;
- alkalická reakce kameniva;
- staticky významné trhliny, nadměrné průhyby, deformace;
- kmitání konstrukce (akustická odezva při přejezdu);
- funkčnost mostních závěrů;
- stav a nastavení ložisek;
- stav základů, stabilita zemního tělesa u krajních opěr;
- chování nosné konstrukce za provozu;
- poruchy způsobené nárazem vozidla do nosné konstrukce mostu. [3]

V případě zjištění jakékoliv poruchy se provede její přesná lokalizace, rozsah a důkladná fotodokumentace. Trhliny mohou být čitelnou známkou poruchy a je vhodné

se na ně zaměřit u všech typů konstrukcí a materiálů (především předpjaté železobetonové nosníky, ocelové nosníky). U větších trhlin se provádí pasportizace a jejich další sledování, u ocelových prvků je třeba posoudit trhliny okamžitě. Na základě zjištěných závad lze navrhnout další podrobnější diagnostiky mostu, které mohou opět vést k zatěžovací zkoušce. [3]

Na výše uvedené vady je třeba brát zřetel u všech částí nosné konstrukce i navzdory tomu, že každá z těchto částí má svá specifika co do chování, namáhání i údržby.

U **nosné konstrukce** je třeba posuzovat stav všech namáhaných prvků, jako jsou nosníky, klenby, části mostovky, ztužidla, i chodníkové konzoly. Pro komorové nosníky je důležitý také vnitřní prostor komor, jeho odvodnění a odvětrání. Nosná konstrukce musí být chráněna před poškozením izolačními vrstvami (krycí beton). U předepnutých konstrukcí je třeba dávat pozor na zatékání vody na předpínací výztuž, zejména v místech příčných spar, spojek kabelů a kotev. Pro ocelové mosty jsou důležité hodnoty deformací a změn geometrie konstrukce (vybočení, prohnutí, boulení) i nadměrné rezonance při provozu mostu. Velká pozornost se také věnuje únavovým poškozením spojů i pomocným konstrukcím jako jsou schodiště, podesty, žebříky. Pro dřevěné konstrukce jsou typické vady spojené s hnilobou, dřevokazným hmyzem a trhlinami v místech spojů. Důležitá je tedy účinnost ochranných prostředků a důkladné větrání všech částí konstrukce.

U **mostních podpěr** jsou předmětem zájmu prohlídky především oslabení vnějšími vlivy (nárazy, podemletí), jejich deformace v prostoru, naklonění, boulení, spoje. Jako ve všech částech konstrukce, i u podpěr je třeba věnovat pozornost místům, kam se může dostat voda, izolacím, utěsněním kotevních prvků. Samozřejmě musí být uváženo technologický postup výroby a materiálové zastoupení v konstrukci.

Založení konstrukce mostu se při prohlídce hodnotí z hlediska zanesení konstrukce, případného obnažení, podemletí, či jiného porušení. Prostor pod mostem musí vždy umožnit plynulý odtok vody, tj. musí být zachován průtočný průřez a ochranné konstrukce, jako jsou ledolamy, musí plnit svůj účel.

Pro **ložiska, klouby** a **mostní závěry** je třeba hodnotit především jejich funkčnost, poškození, zanesení, korozi a také stav jejich ochranných prvků. Při prohlídce je vhodné si uvědomit, že funkce ložisek a kloubů úzce souvisí s funkcí mostních závěrů, v případě vzniklé vady jednoho systému zle tedy najít příčinu v systému druhém.

Při prohlídce **mostního svršku** je hodnocena především kvalita vozovky, chodníku a zálivek. Pozornost je tedy zaměřena na sklony, nerovnosti, tloušťky vrstev, trhliny a měknutí povrchu, a to především v okolí mostních závěrů. [3] ČSN 73 6221 dále uvádí

jako předmět zájmu mostní vybavení, cizí zařízení a území pod mostem. Vzhledem k rozsahu této publikace budou uvedené odstavce opomenuty.

Výsledkem hlavní prohlídky mostu je posouzení stavu mostu a zařídění do klasifikačních stupňů, jež jsou uvedeny v pasportu a mostním listu. Ze zhotovených dokumentů musí být patrný vývoj mostu a průběh jeho životnosti. Výsledný stav mostu je rozdělen do třech rozdílných skupin s vlastní stupnicí klasifikace, tedy:

- Spolehlivost konstrukce (bezvadný - havarijní);
- Bezpečnost provozu (použitelný – nepoužitelný);
- Naléhavost odstranění závady; [3]

Podrobnější zařídění do jednotlivých stavů je uvedeno v ČSN 73 6221 kap. 6.6, včetně součinitele stavu konstrukce α , hodnocení šířky trhlin a termínů odstranění závad.

Veškeré poznatky z hlavní prohlídky budou uvedeny v protokolu včetně fotodokumentace a videozáznamu. Protokol musí obsahovat tyto náležitosti:

- popis částí mostu vč. Stavů a závad;
- zhodnocení péče o most popřípadě navržení změny údržby;
- hodnocení stavu zatížitelnosti mostu;
- požadavky na nové určení zatížitelnosti (diagnostický průzkum);
- stanovení termínu následující prohlídky mostu;

Pokud bude patrné ohrožení bezpečnosti provozu na mostě, musí být záznam z hlavní prohlídky neprodleně doručen příslušnému správnímu orgánu. [3]

2.5 Realizace zatěžovací zkoušky

Jedním z předpokladů uvedení mostní konstrukce do provozu je realizace zatěžovací zkoušky. Pokud se nejedná o laboratorní zatěžovací zkoušky, pak musí být zkouška provedena bez následků, tj. nesmí být ovlivněna únosnost, použitelnost a trvanlivost mostní konstrukce a také nesmí dojít ke škodám na okolním majetku. [1] Rozlišujeme tedy zkoušky do dosažení únosnosti a bez dosažení únosnosti.

2.5.1 Druhy zkušebního zatížení

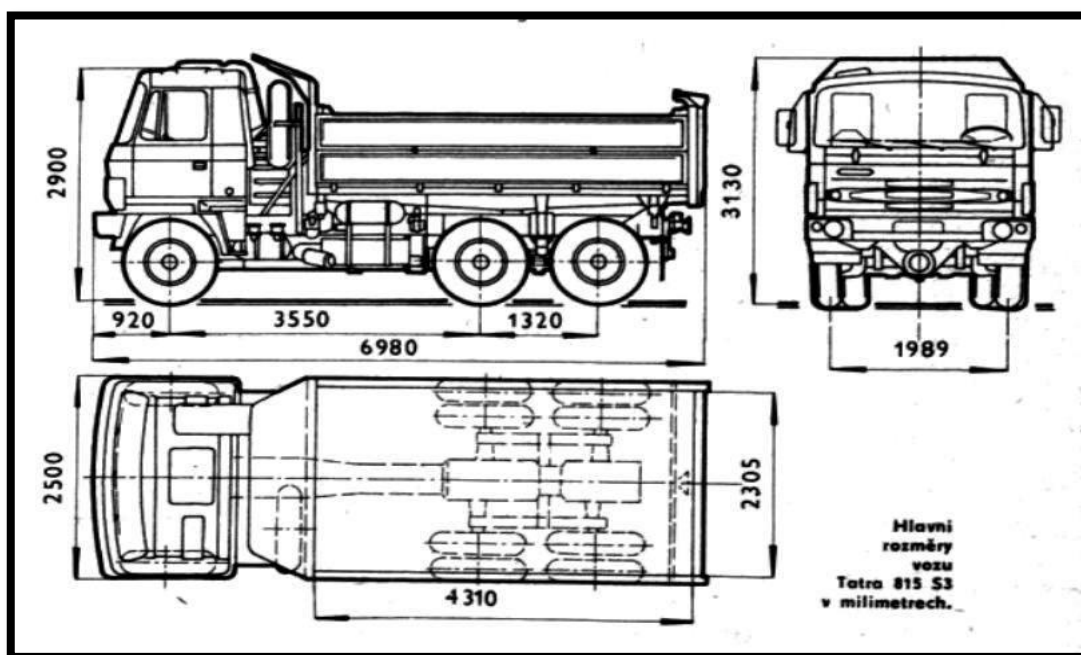
Výběr zkušebních zátěží pro statickou zatěžovací zkoušku je ovlivněn zejména intenzitou požadovaného zatížení. Do samotného zatěžování navíc vstupuje operativní manipulace se zkušební zátěží, podle požadavků statika (laboratoře) na jednotlivé zatěžovací stavy. U mostních konstrukcí se využívají především různé druhy dopravních prostředků v závislosti na typu mostu z hlediska dopravy.

Pro **silniční mosty a lávky** jsou použitelná různá kolová vozidla, stavební stroje nebo jiná soustředěná břemena. Důležité je znát rozvor náprav k určení kolových sil a možnost zatížení vozidla, k nastavení zkušebního zatížení. Naštěstí jsou tyto veličiny snadno měřitelné a lze si tak variabilně volit zkušební zátěž i na místě. Ve stavebních podmínkách



české republiky je nejrozšířenějším nákladním vozidlem Tatra 815 (**Obr. 2.2**). Automobil je dostupný cenově i kusovým zastoupením, je určen k přepravě sypkých materiálů maximální hmotnosti 15,7 tuny a na vozovce může za sebou táhnout jeden nebo více přívěsů do celkové hmotnosti soupravy 44 tun.

Obr. 2.2 Ilustrace vozu Tatra 815 [12]



Obr. 2.3 Hlavní rozměry vozu Tatra 815 [12]



Obr. 2.4 Sfalassabridge [14] **Obr. 2.5** Zatěžovací zkouška z roku 1905 [15]



Obr. 2.6 Zatěžovací zkouška Nuselského mostu z listopadu 1970 (využito 66 tanků) [13]

V případě **lávek pro pěší** rozhodují užité rozměry, obvykle však není problém využít i výše uvedená nákladní vozidla. Lávky pro pěší jsou však nejvíce namáhány větrem a frekvencí kroku chodců, proto jsou pro ně rozhodující zatěžovací zkoušky dynamické. Pro účely statické zatěžovací zkoušky v podstatě postačí jakýkoliv nákladní automobil či jiné vozidlo s měřitelnými rozměry a hmotností, u dynamických zkoušek není problém využít skupiny chodců či cyklistů.

Pro zatěžovací zkoušky **stávajících mostních konstrukcí** je volba zkušebního zatížení komplikovanější. Mosty, které jsou používány a přeprava na nich je frekventovaná, nelze vyloučit z provozu na celý průběh klasického zatěžování. Doba průběhu zatěžování se odvíjí od typu mostu a navrženého programu zatěžovací zkoušky, pohybuje se však v řádech několika hodin až dní. Alternativním řešením klasických šachů vozidel je přejezd nadměrné přepravy. U takové přepravy lze opět určit rozvor náprav a hmotnost soupravy

(stovky tun), bohužel však těchto přejezdů není mnoho a jejich trasa je pevně stanovená. Vyloučeny jsou také manipulační pohyby se zatěžovacím prostředkem. Zatěžovací zkouška je tedy závislá na trase nadměrného přejezdu.



Obr. 2.7 Nadměrná přeprava přes most v Poděbradech [16]

Pro **mosty železniční** se využívají lokomotivy, vagóny i kolejové jeřáby (**Obr. 2.8**), záleží především na dispozicích železničních stanic v okolí zatěžovaného mostu. Pokud je v okolí mostu nedostatek zatěžovacích prostředků, lze použít i vozidla historická (**Obr. 2.8**). U drážních vozidel je známá geometrie, tedy rozvor náprav, a také lze ovlivnit jejich hmotnost naložením jakéhokoliv materiálu. Posun nákladních vagónů pak lze zabezpečit lokomotivou či vlečkou.

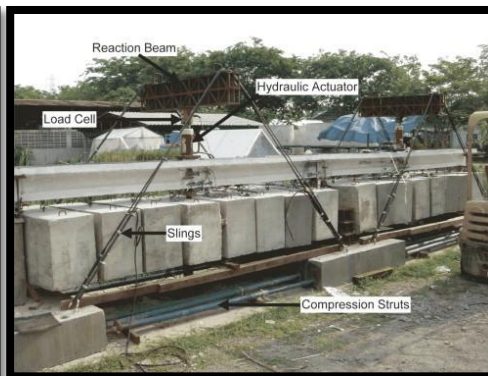


Obr. 2.8 Zatížení mostu lokomotivou [17] / železničním jeřábem [18]

Pro modelové zatěžovací zkoušky se volí zkušební zátěž především na základě manipulačních možností laboratoře, prostorového uspořádání modelu a snadného ověření hmotnosti zatěžovacích dílců. Z prostorových důvodů se obvykle zkouší modely nosných prvků, segmentů nebo výřezů mostní konstrukce, pokud ovšem bude mít zkouška pro další výpočty vypovídající hodnotu. V případě nutnosti lze sestavit model celé mostní konstrukce. Nejčastějšími druhy závaží jsou betonové dílce (**Obr. 2.10**), pytle plněné sypkým materiálem, hydraulické lisy či vodní vaky (**Obr. 2.9**).



Obr. 2.9 Vodní vaky firmy Scandinavia AS [19]



Obr. 2.10 Zatěžovací zkouška modelu mostního trámu [20]

V případě dynamických zatěžovacích zkoušek jsou voleny k zatížení různé druhy budičů kmitů, železniční a silniční vozidla či vozidla přejíždějící přes válcové úseče. U lávek postačí skupina osob. Zatěžovací zkoušky dynamické nejsou předmětem této práce.

2.5.2 Velikost zkušebního zatížení

Norma ČSN 73 6209 uvádí vzorec k výpočtu velikosti zkušebního zatížení:

$$U_N = k \cdot U_{V_s} \quad (2.1)$$

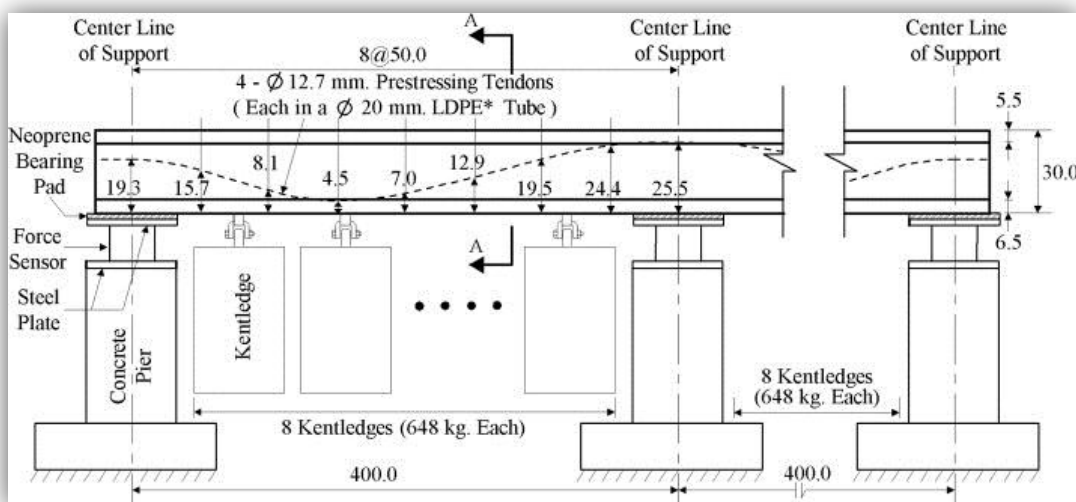
- k účinnost (pro statické zatěžovací zkoušky značeno jako k_{stat}), její hodnota se pohybuje v intervalu $0,5 < k_{stat} \leq 1,0$
- N zkušební zatížení
- V_s charakteristická hodnota svislého nahodilého krátkodobého zatížení
- U_N statický účinek od zkušebního zatížení N
- U_{V_s} statický účinek od charakteristické hodnoty svislého pohyblivého nahodilého krátkodobého zatížení vč. dynamického součinitele δ
- δ dynamický součinitel použitý při navrhování nebo přepočtu[1]

Volba zkušební zátěže je ovlivněna manipulační schopností zatěžovacích prostředků a jejich dostupností, **snaha je přiblížit se účinnosti rovné 1,0**. Odchylka požadované a skutečné hmotnosti zatěžovacích prostředků nesmí přesáhnout 5%.

2.5.3 Uspořádání zkušebního zatížení

Zkušební zatížení se uspořádá na zkoušeném mostě tak, aby vyvodilo co největší účinky na měřených místech. U mostů pozemních komunikací lze variabilně volit rozmístění zátěže v příčném i podélném směru podle potřeby zkušebního programu. Obvykle se porovnávají předpoklady návrhu se skutečným chováním konstrukce, rozmístění zátěže tedy volí statik, či zkušební laboratoř po konzultaci se statikem.

Výsledkem je vypracování zatěžovacího schématu, ve kterém jsou vykázány zatěžovací prostředky a popis rozmístění zkušebního zatížení včetně zakreslení.



Obr. 2.11 Zatěžovací schéma modelu mostního trámu, viz obr. 2.10 [20]

2.5.4 Obecný zatěžovací postup

Před zatěžovací zkouškou je třeba na určitou dobu nahradit všechny dlouhodobé složky zatížení, které budou působit na konstrukci při předpokládaném užívání. Tuto složku zatížení značíme jako T_1 , pro betonové mosty má hodnotu 72 hodin, pro ocelové mosty 3 hodiny. Složka zatížení T_1 bude samozřejmě působit po celou dobu vlastního zatěžování konstrukce. Pokud nelze takové zatížení uložit v některých částech mostní konstrukce, je třeba pomocí doplňkového zatížení vyvodit odpovídající statický účinek ve sledovaných průřezích. Uvažované rozdílné zatěžování musí být ověřeno statickým výpočtem a uvažuje se pouze tehdy, je-li skutečné stálé zatížení během zkoušky menší od předepsaného o víc než 5%. [1]

Ocelové mosty je možno začít zatěžovat takřka ihned po montáži, u mostů betonových do zkoušení však zasahuje přirozené chování betonu, tedy zrání, smršťování, dotvárování apod. Norma ČSN 73 6209 tedy uvádí tříměsíční lhůtu od betonáže hlavních nos-

ných prvků mostu a zainjektování kabelových kanálků soudržné předpínací výztuže. V případě nutnosti lze tříměsíční lhůtu zkrátit na 28 dní, pokud během této doby neklesla teplota pod 5°C, současně nesmí hodnota N přesáhnout hodnotu $0,9 U_{Vs}$ (kap. 2.5.2) a musí být dosaženo kontrolní pevnosti betonu ve smyslu ČSN 73 2400.

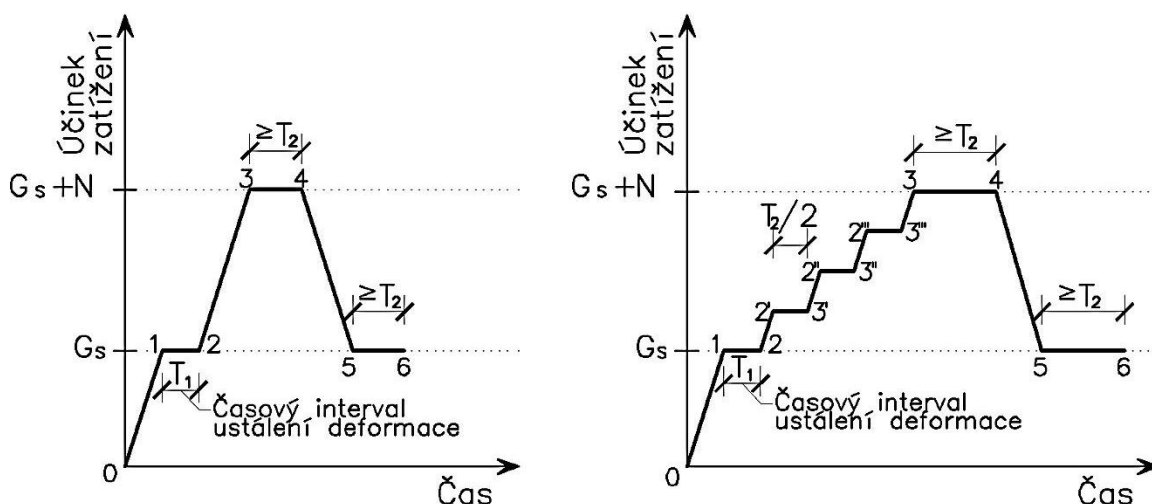
Statická zatěžovací zkouška má tento průběh:

- a) „zkušební zatížení se umístí do určené polohy v době co nejkratší a bez nárazů a otřesů, i v několika stupních (**obr. 2.13**), vozidla zajedou do těchto poloh rychlostí maximálně 5km/h;
- b) zkušební zatížení musí působit na mostní objekt tak dlouho, až se měřené veličiny ustálí, nejméně však po dobu T_2 ;
- c) odlehčuje se obvykle v jednom stupni, při použití vozidel jejich pomalým odjetím z mostní konstrukce; doba odlehčení se určí stejným způsobem jako doba, po kterou působilo plné zatížení;
- d) po dobu působení zkušebního zatížení i po odlehčení se měří sledované veličiny průběžně nebo ve vhodných časových intervalech; přírůstky měřených veličin se musí sledovat a podle jejich průběhu se řídí operativně postup zatěžování.“ [1]

Doba uložení plného zkušebního zatížení T_2 je dána pro betonové mosty **$T_2 = 30$ minut** a pro mosty ocelové **$T_2 = 15$ minut**. „Účinek zkušebního zatížení se považuje za ustálený, je-li po třiceti minutách (15minut pro konstrukce ocelové) po dosažení nebo po odlehčení na příslušný zatěžovací stupeň změna účinku v časovém intervalu deset minut menší než nejmenší z těchto hodnot:

- 20% ze změny účinku v předchozím časovém intervalu 10 minut;
- 2% z celkové změny účinku příslušného zatěžovacímu stupni;
- 50% z nejmenší jednotky měřicího přístroje;
- dvojnásobek chyby měřicí soustavy.“ [1]

Norma pak nařizuje odečítat hodnoty na měřicích přístrojích alespoň dvakrát před zatížením, vždy krátce před umístěním zatížení, ihned po zatížení a v časových intervalech dlouhých maximálně 10 minut. Při odlehčování se odečítá stejným způsobem jako při zatěžování. Postup odečítání deformací se vztahuje především k mechanickým snímačům, kde vzniká nutnost vždy přečíst a zapsat hodnotu deformace a to ve všech sledovaných místech. Rostou tak nároky na počet pracovníků a organizaci obsluhy zatěžovací zkoušky. V dnešní době jsou běžné digitální snímače napojené na ústřednu, jenž deformace ihned převádí do grafické podoby, postačí tak jeden pracovník hlídající čas a ustálení deformací.



Obr. 2.12 Základní zatěžovací postup a postup zatěžování ve stupních

Při zkoušení mají být pokud možno vyloučeny nerovnoměrné změny teploty na konstrukci, u konstrukcí citlivých na vliv teplotní změny je vhodné provést nezávislé měření chování konstrukce při rozdílných teplotách i v nezatíženém stavu a výsledný závěr pak zavést do vyhodnocení zatěžovací zkoušky.[1]

2.6 Vyhodnocení zatěžovací zkoušky

2.6.1 Posouzení únosnosti

Statické zatěžovací zkoušky se obecně hodnotí z hlediska spolehlivosti pomocí porovnání skutečných průhybů s dosažením mezních stavů použitelnosti. Potřebná kritéria hodnocení jsou uvedeny v ČSN 73 6209 (pouze pro mosty betonové a ocelové) a liší se v závislosti na stáří konstrukce (nové, dosavadní, přestavované mostní objekty). V případě jiné konstrukce než betonové či ocelové se využijí v rozumném rozsahu kritéria z normy ČSN 73 2030. [1] V ideálním případě je konstrukce posouzena porovnáním teoreticky vypočteného účinku zatížení se skutečným. Bohužel u některých stávajících konstrukcí nelze zjistit skutečné parametry použitých materiálů a vyztužení, pak je třeba aplikovat normový postup posouzení.

Po ukončení statické zatěžovací zkoušky se odečtou hodnoty deformací získané měřicí aparaturou. Od těchto veličin se následně odečtou vlivy zatlačení ložisek, poklesy podpěr, popř. vlivy teploty, přitom platí vztah.

$$S_{tot} = S_r + S_e \quad (2.2)$$

Kde:

S_{tot} celkové účinky;

S_r trvalé účinky;

S_e pružné účinky.

Dále je třeba vyhodnotit teoreticky stanovené hodnoty účinků S_{cal} v závislosti na skutečné velikosti použité zátěže N . Pro každý zatěžovací stav lze provést maximálně tři zatěžování, v případě mostních konstrukcí však rozhodují deformace naměřené při prvním zatěžování.

Mostní konstrukci lze prohlásit za vyhovující, jsou-li splněny tyto podmínky:

a) poměr změřených pružných složek S_e k teoreticky stanoveným hodnotám S_{cal} je menší nebo roven α , ale větší než β , tj.:

$$\beta < \frac{S_e}{S_{cal}} \leq \alpha \quad (2.3)$$

b) poměr změřených trvalých složek S_r k celkovým změřeným složkám S_{tot} účinku je menší nebo roven hodnotě α_1 , tj.:

$$\frac{S_r}{S_{tot}} \leq \alpha_1 \quad (2.4)$$

V případě nových a dosavadních mostních konstrukcí, u nichž se může uplatnit vlivem zatížení jednorázové popuštění podpor či dotlačení spojů je vhodné konstrukci posuzovat na účinky vyvozené druhým zatěžováním. Pokus se při prvním zatěžování projeví poměr mezi trvalým a celkovým přetvořením větší než α_1 ale menší než α_2 , je možno zatěžovací stav opakovat.

$$\alpha_1 < \frac{S_r}{S_{tot}} < \alpha_2 \quad (2.5)$$

Pokud bude konstrukce posuzována na hodnoty naměřené při druhém zatěžování, je třeba, aby poměr trvalých složek k celkovým hodnotám byl menší než hodnota α_3 , tj.:

$$\frac{S_r}{S_{tot}} < \alpha_3 \quad (2.6)$$

Nelze-li dodržet podmínku 2.6, je možné zatěžovací stav ještě jednou opakovat, nesmí však poměr trvalých účinků k celkovým účinkům překročit hodnotu šestiny $\frac{1}{6}$, tj.:

$$\frac{S_r}{S_{tot}} \leq \frac{\alpha_1}{6} \quad (2.7)$$

Tab. 2.1:

Konstrukce	α	α_1	α_2	α_3	β
předpjatý beton spřažení ocel-beton	1,05	0,20	0,50	0,10	0,70
železobeton; spřažení železobeton-beton	1,10	0,25	0,50	0,125	0,6
ocelové konstrukce	1,05	0,10	0,30	0,05	0,80

Pokud nejsou splněna výše uvedená kritéria, je třeba znovu prozkoumat všechny okolnosti, které mohly zapříčinit nevyhovující výsledky (rozměry konstrukce, vlastnosti materiálu, dotlačení spojů apod.) a nalézt příčinu neshody. Teprve po ověření všech možností zkreslení výsledků zkoušky včetně přepočtu konstrukce s využitím poznatků ze zkoušky je možno zkoušení opakovat.[1]

Nevyhoví-li konstrukce ani při třetím pokusu zatěžovací zkoušky, nebo jsou-li hodnoty S_r/S_{tot} při prvním zatěžování větší než α_2 , je nutné:

- prověřit systém kontroly řízení jakosti;
- provést výpočet zatížitelnosti mostu na základě vyhodnocení zkoušky;
- zajistit dlouhodobé sledování mostní konstrukce;
- provést dynamickou zkoušku.

Na základě těchto zjištění se projedná dalším nakládání s mostní konstrukcí. [1]

Pokud bylo nutné z nějakého důvodu zatěžování přerušit, a přitom plné zkušební zatížení působilo alespoň polovinu doby T_2 , posuzuje se konstrukce při opakovaném zatěžování podle vzorců 2.3 a 2.6. Při kratší době působení zatížení než T_2 se konstrukce posuzuje jako při prvním zatěžování, tj. vzorce 2.3 a 2.4. Tyto podmínky platí pro mosty nové a dosavadní přestavované. [1]

Pakliže je zatěžovací zkouškou získáno více druhů veličin, pro vyhodnocení způsobilosti konstrukce jsou rozhodující deformace ve středu rozpětí a v místech největších očekávaných průhybů a to při takových zkušebních zatíženích, které v těchto místech vyvolají největší účinky.

2.6.2 Posouzení spolehlivosti

Mostní konstrukce z hlediska mezních stavů spolehlivosti, jsou-li splněny následující předpoklady:

- šířka trhlin u konstrukcí z prostého, železového a předpjatého betonu vyvozená svislým normovým pohyblivým zatížením nepřekračuje hodnoty uvedené v tabulce 2.2;
- trhliny se neobjeví při zatížení menším než 90% teoretického zatížení, po kterém by se měl vznik trhlin projevit;
- vzniklé trhliny se uzavřou minimálně na polovinu hodnoty uvedené v tabulce 2.2;
- u lávek pro chodce a cyklisty je zavedeno kritérium spolehlivosti na základě účinků vibrací na lidský organismus. [1]

Tab. 2.2:

Nosné konstrukce	Třída prostředí (ČSN 73 6206)	Mezní šířka trhlin
Železobetonové	1 (suché) 2,3 (vlhké) 4,5	0,4 0,3 Dle agresivity, max 0,1
Částečně předpjaté	1 2,3 4,5	0,2 Dodatečně předpjaté 0,1 Předem předpjaté 0,0 0,0
Omezeně a plně předpjaté	Jakékoliv	0,0

2.8 Zkušební protokol a zpráva o zatěžovací zkoušce

Závěrem každé zatěžovací zkoušky je vyhodnocení výsledků a zpracování dokumentů pověřenou laboratoří, která prováděla realizaci zatěžovací zkoušky.

Zkušební protokol má obsahovat nejméně tyto údaje:

- identifikační data laboratoře (zkušebny);
- identifikační data objednatele;
- veškeré časové údaje a harmonogramy zkoušky;
- identifikační a hlavní údaje o zkoušeném mostním objektu;
- popis zkušebního zatížení, jeho velikost vč. identifikačních údajů vozidel, schematický náčrt rozmístění na konstrukci, výpočet nápravových sil apod.;

- popis zatěžovacích stavů;
- postup zatěžovací zkoušky;
- měřené veličiny, použité měřicí mechanismy a schéma jejich zapojení, vč. nejistot měření;
- poloha měřických bodů na konstrukci;
- údaje o klimatických vlivech, které by mohly ovlivnit výsledek zkoušky;
- hodnoty změřených veličin a popisy sledovaných jevů. [1]

Zpráva o zatěžovací zkoušce by měla obsahovat údaje v podstatě stejné jako zkušební protokol, navíc však:

- identifikační údaje zpracovatele zprávy o zatěžovací zkoušce;
- účel zatěžovací zkoušky;
- údaje o zatížení, na které je most navržen;
- údaje o statickém působení mostní konstrukce;
- výsledky výpočtu teoretických účinků;
- fotodokumentaci a videozáznamy;
- vyhodnocení zkoušky;
- výsledky pozorování konstrukce před, v průběhu a po zatěžování, vč. posouzení závažnosti nápadných jevů;
- komentáře ke zkoušce, celkové hodnocení konstrukce a vyjádření zda odpovídá požadavkům projektové dokumentace. [1]

Vedoucí zatěžovací zkoušky může podat po skončení zatěžování předběžné vyjádření, především ohledně pozorovaných jevů při zatěžování, dodržení programu zkoušky, nebo předběžné vyhodnocení zatěžovací zkoušky. Konečné vyjádření o způsobilosti mostní konstrukce vydává právnická osoba k této činnosti pověřená, na základě zkušebního protokolu a zprávy o zatěžovací zkoušce. [1]

3. Měření přetvárných veličin

Při zatěžovací zkoušce mostu musí být naměřené veličiny získány s odpovídající přesností bez jakéhokoliv zkreslení okolními vlivy. Vzniká tak požadavek na vysokou přesnost měřících přístrojů a důmyslnou volbu metod měření, všechny naměřené hodnoty přetvárných veličin musí splňovat účel zatěžovací zkoušky. Pro přehlednost měřených veličin při zatěžovací zkoušce je třeba zpracovat protokol, ve kterém budou obsaženy především tyto údaje:

- základní charakteristiky mostního objektu;
- datum měření;
- povětrnostní vlivy včetně teplot jednotlivých částí konstrukce;
- použité měřicí přístroje, schéma jejich zapojení, nastavená citlivost snímání, kalibrace přístrojů, výchozí stavy přístrojů, rozdíly následujících čtení;
- měřené přetvárné veličiny (průhyby, posunutí);
- charakteristika použité zkušební zátěže, hmotnost, geometrie, nápravné síly (v případě dynamických zkoušek údaje o odpružení, útlumu, budiči kmitů);
- popis zatěžovacích stavů – pořadová čísla, označení jednotlivých zatížení, schéma uspořádání zatížení na konstrukci, doba působení zatížení apod. [1]

Pro statické zatěžovací zkoušky je třeba měřit konkrétně:

- svislý průhyb mostního pole v místě jeho největší očekávané hodnoty;
- pokles podpor a deformace ložisek;
- teplota vzduchu a konstrukce průběžným záznamem;
- poměrná přetvoření v exponovaných místech mostní konstrukce;
- průhyby, posuny a pootočení částí konstrukce dle požadavků zatěžovací zkoušky;
- deformace spodní stavby konstrukce;
- vodorovné příčné deformace tlačných pásů mostů s otevřeným příčným průřezem;
- vznik a chování trhlin v závislosti na jednotlivých zatěžovacích stavech; [1]

Pozn. Obecně měření svislých průhybů je prakticky nejspolehlivější.

V extrémních případech kdy dojde k porušení stability mostní konstrukce vlivem zatěžovací zkoušky (nadměrná deformace, vznik trhliny u ocelových konstrukcí) je třeba okamžitě zkoušku přerušit a objasnit příčiny porušení. [1] Pokud se však zatěžovací

zkouška odehrává v laboratorních podmínkách a nebrání-li nic modelu v jeho destrukci, lze zkoušku provádět do dosažení únosnosti.

Svislé průhyby a vodorovné posuny se v příčném směru vždy měří ve více bodech, v závislosti na geometrii konstrukce. Má-li konstrukce dva hlavní nosníky, je třeba měřit deformace obou z nich, pokud má konstrukce více nosníků, je třeba deformace měřit tak, aby bylo možno zachytit příčné roznášení. V případě deskové konstrukce je třeba měřit minimálně krajní a osově deformace bodů konstrukce. [1] V podélném směru jsou zásadní místa k měření uprostřed rozpětí či v místech maximálních ohybových momentů a u podpor. Pro kontrolu teoretických výpočtů je vhodné znát deformace i v dalších místech konstrukce, měřicí zařízení se tedy osadí v závislosti na statickém působení a rozpětí nosných polí (např. ve čtvrtinách). Dále se běžně měří poměrné deformace v místech maximálních ohybových momentů, běžně uprostřed rozpětí a nad podporami. Pomocí hodnot poměrných deformací lze také ověřit roznášení nápravových tlaků (v podélném i příčném okolí zatěžovacího prostředku) a doplnit či ověřit předpoklady statického výpočtu.

Pro objasnění měřičských anomálií je vhodné měřit celkové zatlačení konstrukce nezávislou optickou nivelací z bezpečně nedeformované oblasti. Při vyjádření poměru vlastní tíhy celé konstrukce a velikosti zkušebního zatížení vzniká otázka, zdali má nezávislé měření poklesu podpor význam. V případě vysokých mostů a atypických geometrických dispozic je také vhodné měřit naklonění podpěr.

V protokolu o zatěžovací zkoušce musí být vždy uvedeno jaké konkrétní deformace a veličiny budou měřeny a za jakým účelem. V závislosti na účelu zatěžovací zkoušky je vhodné rozdělit měření do skupin (např. hlavní, vedlejší, doplňující) a věnovat tak jednotlivým měřicím skupinám odpovídající pozornost. Nejdůležitější pro vyhodnocení jsou svislé deformace a poklesy podpor, následují tenzometrická měření a naklonění pilířů a jako doplňující měření jsou chápány atmosférické podmínky (teplota, rychlost větru apod.).

3.1 Měření průhybů a poklesů podpor

Jak již bylo uvedeno, tato měření jsou pro vyhodnocení statické zatěžovací zkoušky rozhodující a je třeba jim věnovat největší pozornost. U komplikovaných konstrukcí je vhodné navrhnout měření pomocí dvou odlišných a na sobě nezávislých metod, aby bylo možné prokázat velikost skutečných chyb měření, které musí být samozřejmě v mezích přípustnosti.

3.1.1 Geodetické metody

Základní rozdělení geodetických principů zjišťování vertikálních rozdílů je následující:

- trigonometrické měření výšek (přesnost 0,1 m až 0,01 m)
- optická nivelace (přesnost 1,0 mm až 0,1 mm)
- hydrostatická nivelace (přesnost 0,1 mm až 0,05 mm)

Trigonometrické měření je prováděno pomocí teodolitů a totálních stanic, je nezbytné pro prostorové zaměřování stavebních a polohopisných bodů. Vhodné je také pro určování větších výškových rozdílů a vertikálních poloh nepřístupných bodů. Pro zatěžovací zkoušky je kvůli malé přesnosti nedostačující, může však posloužit pro ověření celkových deformací konstrukce a to především prostorových odchylek a úhlových změn.

Jednou z tradičních metod měření svislých deformací je přesná **optická nivelace** prováděná z vnějších pozorovacích stanovišť, případně doplněná měřením na uzavřeném polygonu. Nivelace vhodně slouží i pro kontrolu poklesu celé konstrukce z nezávislého stanoviště a to nejen při zatěžování ale i během životnosti konstrukce. Základním principem je optické odečítání ze stupnice na nivelační lati s kvalitním měřítkem pomocí nivelačního přístroje, tvořícího vodorovnou přímku. Běžné stavební nivelační přístroje mají přiblížení 17x-20x, záměra se tedy pohybuje do 25m a jsou snadno dostupné. Bohužel jsou tyto přístroje díky malé přesnosti nedostačující. Pro zatěžovací zkoušky jsou využitelné **velmi přesné nivelační přístroje**, obvykle vybaveny kompenzátorovým mechanismem k urovnání přístroje. Kompenzátor je opticko-mechanický prvek, udržující optickou osu



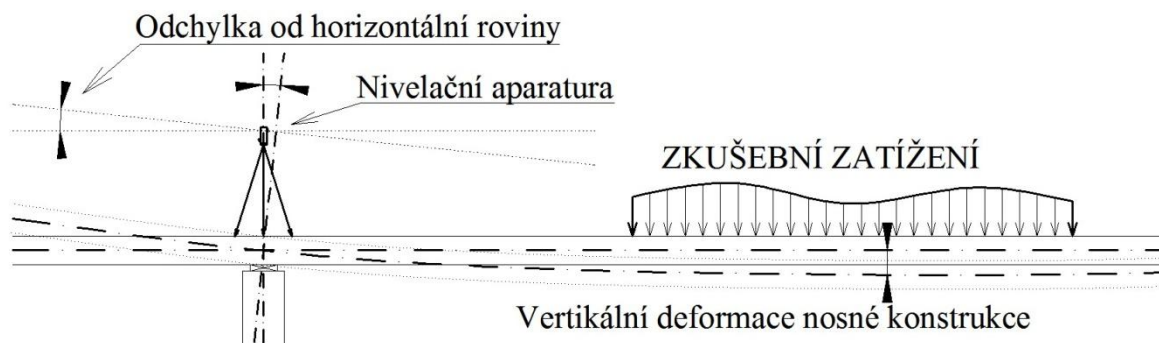
Obr. 3.1 Zeiss NI 007 [5]

nivelačního přístroje v horizontální poloze. Tyto přístroje mají přiblížení 24x-44x a přesnost do 0,3mm (střední jednotková kilometrová chyba obousměrné nivelace). Běžnými výrobci velmi přesných nivelačních přístrojů jsou firmy Zeiss, Leica nebo OPTON.

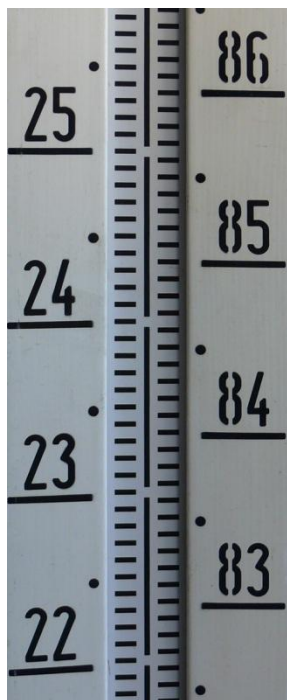


Obr. 3.2 Přesná nivelace statické zatěžovací zkoušky mostu [22]

Při využití nivelačních metod pro celý průběh zatěžovací zkoušky je vhodné osadit měřicí aparaturu mimo oblast deformovanou zkušebním zatížením. V praxi se však často setkáváme s konstrukcemi, jejichž prostorové dispozice neumožní osadit aparaturu mimo zatíženou oblast tak, aby byla zajištěna viditelnost na všechny požadované měřičské body. Situaci může zkomplikovat nevhodná topografie v okolí mostu, či clonící protihluková stěna (**obr. 3.2**). V případě nutnosti osazení měřicího zařízení na mostní konstrukci je třeba brát ohledy na celkovou deformaci mostu. Jako ideální místo se jeví nad podporou, kde se vertikální deformace sice objeví, ale pro měření průhybu v poli mají v podstatě rektifikační účinek. V případě spojitých nosníků dojde nad podporou mimo jiné i k pootočení konstrukce a tím naklonění nivelačního přístroje a natočení vodorovné přímky (**obr. 3.3**). Přístroj musí být tedy soustavně urovnáván, což omezuje využití nivelačních přístrojů pouze na přístroje vybavené kompenzátory. Pro korekci měření je vhodné používat více než jednu měřicí aparaturu.



Obr. 3.3 Schématické zobrazení deformace horizontální roviny



Obr. 3.4 Přesná nive-
lační latě [5]

Nezbytné doplňky pro nivelaci jsou nivelační latě, podložky a také vhodně zařazované měřené body. Kvalita těchto pomůcek bezprostředně ovlivňuje výsledky nivelačního měření. Pro velmi přesnou nivelaci se používají latě délky 1,8 m a 3,0 m vyrobené z jednoho kusu materiálu s půlmilimetrovým dělením stupnice vyznačené na invarovém pásu. Dolní část pásu je spojena s kovovou patkou a na druhém konci je pás napínán silou 200N, zadní strana latě je opatřena libelou. Latě musí být držena zkušeným pracovníkem, v případě nedostatku pracovníků či velkého počtu měřených míst lze latě zařazovat do stojanu.

Jako při každém měření, i při nivelaci vznikají chyby, které se obecně dělí dle účinku na hrubé, náhodné a systematické.

Hrubé chyby vznikají při nepozornosti či nedodržení zásad měření, a v případě zatěžovacích zkoušek je lze eliminovat dalším nezávislým měřením. **Náhodné chyby** mohou mít kladný i záporný účinek a vznikají například nejistotou při odečítání z lati či nejistotou v urovnání libely – kompenzátoru. **Systematické chyby** jsou způsobeny opakováním chyb malých a zdánlivě bezvýznamných, ovlivňují však nivelaci na velkých vzdálenostech a plochách. Patří k nim zejména:

- nesplnění podmínek nivelačního přístroje – eliminace rektifikací přístroje či metodikou měření;
- chyba ze zakřivení Země a z refrakce - eliminace stejná jako v předchozím bodě;
- chyba z nesprávné délky latěového metru – kalibrace invarové stupnice;
- chyba z úklonu latě – kalibrace kruhové libely
- chyba ze zapadání přístroje a latě – pouze na měkkém terénu, eliminace důkladným zašlapáním stativových nohou a hrotů nivelační podložky.

Dále jsou nivelační metody zatíženy chybou způsobenou povětrnostními vlivy, která samozřejmě roste se vzdáleností odečítání z nivelační lati. Nivelační přístroje jsou velice citlivé mechanismy, které je třeba kalibrovat v pravidelných intervalech, před každým důležitým komplexem měření i po dlouhém transportu. Přesná optická nivelace má své podmínky měření a zásady, které je třeba dodržovat, proto je vhodné přenechat ji profesionálnímu personálu. Na kvalitě nivelační aparatury, zkušenosti obsluhy a také na povětrnostních vlivech závisí odpovídající přesnost nivelačních metod.

V dnešní době lze opatřit i elektrické kompenzátorové přístroje s latí vybavenou čárovým kódem. Tyto mechanismy jsou vyvinuty za účelem urychlení geodetických prací a jejich přesnost není pro zatěžovací zkoušky dostačující. Geodetické metody jsou velmi často využívány jako kontrolní měření pro zatěžovací zkoušky, a také jsou nezbytné při měření mostních konstrukcí nad prudkými řekami či hlubokými údolími. Mezi nevýhody patří snižující se přesnost s rostoucí vzdáleností, relativně malý počet měřických míst a často vzniklá clona zkušebním zatížením (nadměrným přejezdem).

Při **hydrostatické nivelaci** využíváme pro určení převýšení mezi dvěma body fyzikální vlastnosti kapaliny umístěné ve dvou spojitých nádobách. Jedná se o dvě měřící aparatury propojené hadicí. Měřící nádoby jsou obvykle osazeny pomocí speciálních konzol na dva měřící body, mezi kterými výškový rozdíl určujeme. Pro kapalinu v hydrostatické aparatuře platí Bernoulliho rovnice rovnováhy:

$$p_1 + \rho_1 \cdot g \cdot h_1 = p_2 + \rho_2 \cdot g \cdot h_2 \quad (3.1)$$

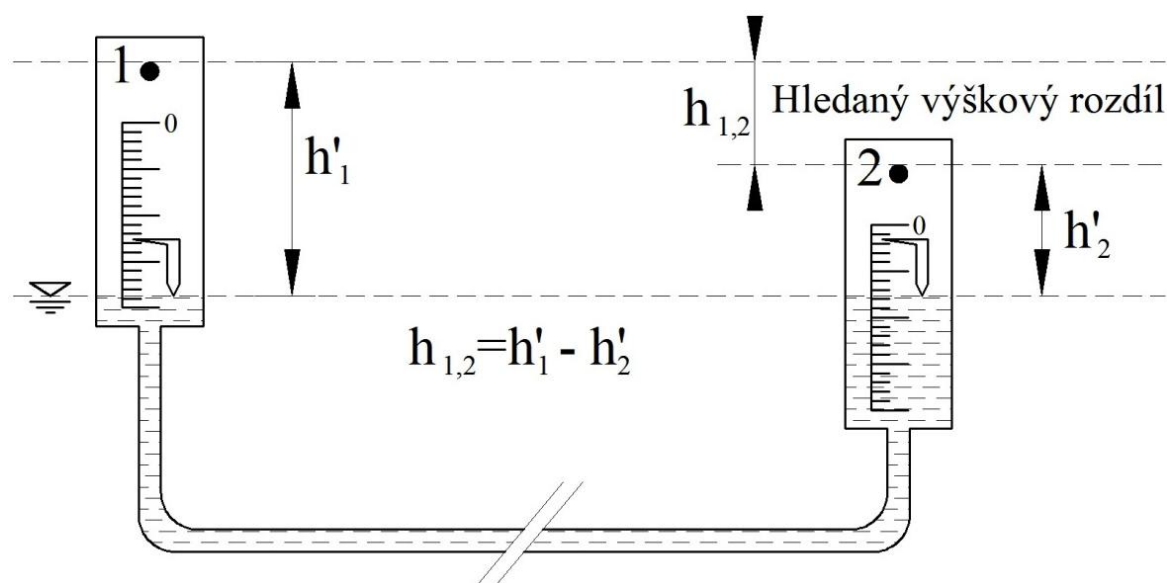
Kde: p ... atmosférický tlak vzduchu

ρ ... hustoty kapalin v nádobách

h ... relativní výšky hladin v nádobách

g ... gravitační konstanta

Za předpokladu ideálních podmínek je $p_1 = p_2$, $\rho_1 = \rho_2$, a tedy i $h_1 = h_2$ – hladina ve spojených nádobách vytváří společnou hladinovou rovinu. K přesnému určení výškového rozdílu mezi měřickými body je třeba měřit hloubky hladin kapaliny, viz **obr. 4.5**.



Obr. 3.5 Princip hydrostatické nivelace

Hodnoty h'_1, h'_2 lze snímat mikrometricky, opticky nebo elektronicky, přičemž dotyk hrotu s hladinou kapaliny se určuje vizuálně, světelnou signalizací či elektronickou registrací.

Čtení lze vykonat s přesností 0,01 mm, při eliminaci systematických chyb pak hydrostatická nivelace může dosáhnout přesnosti v určení převýšení až 0,05 mm. Rozsah měřeného převýšení by neměl překročit 100 mm a vzdálenost bodů 30 m. V současnosti jsou vyvinuty automatické hydrostatické soupravy, kde se hrot posouvá k hladině krokovým motoráčkem, po dotyku s hladinou se automaticky zastaví a počet impulzů (kroků) se elektronicky spočítá. Přístroj má zabudovaný výpočetní systém, díky kterému lze dosáhnout přesnosti 0,003 až 0,01 mm.



Obr. 3.6 Klasická tzv. šlauchváha [28] **Obr. 3.7** Digitální hadicová vodováha [24]

Vzhledem k vysoké přesnosti, ale i k omezeným manipulačním parametrům jsou hydrostatické soupravy osazovány jako stacionární. Bývají trvale zabudovány na stavebních objektech, jako jsou turbogenerátory, v základech strojových zařízení či na blocích jaderných reaktorů, kde je třeba deformace snímat kontinuálně a dlouhodobě. [5]

Pro statické zatěžovací zkoušky mostních konstrukcí jsou hydrostatické nivelační přístroje principiálně použitelné. Bohužel k dosažení požadované přesnosti je třeba využít elektronické přístroje, které jsou cenově sice dostupné, ale vzhledem k množství měřičských bodů (každý bod potřebuje svoji aparaturu) lze tuto metodu využít pouze jako doplňkovou. Samozřejmě pokud to dispozice laboratoře umožní, využití těchto metod se meze nekladou.

Geodetické metody jsou velmi často využívány jako hlavní, popř. kontrolní měření pro zatěžovací zkoušky, jsou nezbytné a často jediné vhodné řešení např. při měření mostních konstrukcí nad nepřístupným terénem.

3.1.2 Mechanické metody

Jedním z nejstarších způsobů měření délek a jejich změn využívá **přístrojů na principu posuvného měřítka** (vernier, lidovým jazykem šuplera). Konstrukce klasického vernieru je složena z kovového měřítka s rytou stupnicí (jezdce), která se posouvá vzhledem k základní stupnici vernieru. Z této lze odečítat s přesností až 0,02 mm. V současné době se vyrábějí i digitální posuvná měřítka s magnetickou stupnicí a číslcovým displejem, s přesností 0,01 mm. Tyto přístroje mají obrovské uplatnění v laboratořích a dílnách, co se konstrukcí in-situ týče, jsou vhodné k měření šířky trhlin, rozměrů armatury apod.



Obr. 3.8 Klasický vernier

Dalším z běžných přístrojů pro měření délkových změn jsou číselníkové úchylkoměry, obecně zvané **indikátorové hodinky** (**obr. 3.9**). Ve své podstatě jde o velmi jednoduchý a přesný způsob měření. Hodinky fungují na principu posouvání dotykového hrotu a přenášení posuvu na ručičky přístroje. Rozsah hrotu bývá běžně 10mm, přesnost 0,01mm až 0,001 mm. Jako většinu měřičských mechanismů, i hodinky je třeba kalibrovat. Na trhu je celá řada různých druhů úchylkoměrů, konstruovaných za konkrétním účelem využití. Rozdíly jsou především ve zdvihu dotykového hrotu, toleranci a přesnosti a také ve vyob-



Obr. 3.9 Číselníkový úchylkoměr

razení měřené veličiny (digitální přístroje). Vzhledem k tomu, že hodinky musí být osazeny na pevné základy, mají využití především v laboratořích a na konstrukcích vhodných rozměrů. U mostních konstrukcí je lze využít například pro měření hodnoty zatlačení ložisek.

Pro zatěžovací zkoušky mostních konstrukcí se běžně používají klasické průhyboměry. U těchto přístrojů lze snadno překonat velký rozdíl místa snímání a měřického bodu a není problém osadit jich pod měřenou konstrukci větší množství, dle požadavků na zatěžovací zkoušku. Principem měření deformací je sledování pohybu závěsného drátu, který je připevněn ke spodnímu líci zkoušené konstrukce v místě měřeného bodu. Nejspolehlivější připojení drátu ke konstrukci je pomocí vrutu, do nějž je osazeno oko či šroub na připevnění závěsného drátu. Ve většině případů je však problematické se ke spodnímu líci dostat s vrtným mechanismem, pak mohou vhodně posloužit například sádrové terčíky. Na dolním konci drátu je upevněno závaží tak, aby udrželo drát v napjatosti a současně aby se vyvozené napětí pohybovalo v pružné oblasti drátu. U závěsných drátů začíná jedna z možných chyb při měření, která je ovlivněna především materií drátu a povětrnostními vlivy, této problematice je věnována kapitola 5.

Vertikální pohyb drátu je pak sledován mechanismem, pracujícím na podobném principu jako číselníkové úchylkoměry. Jedná se o klasické **průhyboměry mostní krabíkové**. Hodnota průhybu je k přístroji vnášena závěsným drátem, strunou či jiným pružným elementem. Indikační stupnice je kruhová, rozdělená na třicet dílů, přičemž jednomu dílu na stupnici odpovídá pohyb struny 1 mm. Navíc je každý z těchto dílů rozdělen ještě na deset částí, takže lze spolehlivě odečítat 0,1 mm (odhadem i o řád méně).

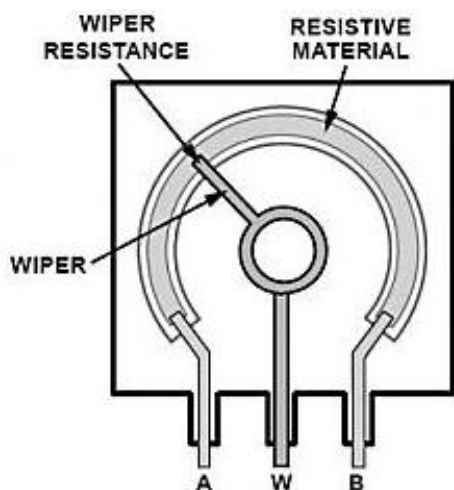


Obr. 3.10 Průhyboměr Frič, Metra

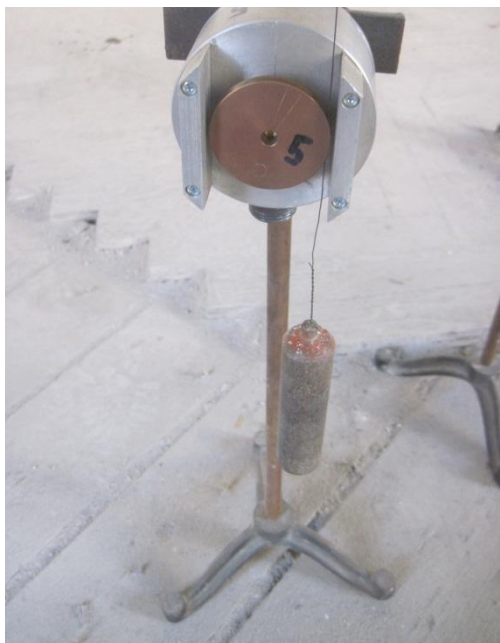
3.1.3 Elektronické metody

K typickým elektrickým snímačům deformací patří mechanismy potenciometrické a indukční, které v podstatě patří mezi klasické průhyboměry, jen proces vyhodnocení pohybu drátu se mění. Podstatou měření je zachycení deformace a její následné převedení na elektronické veličiny, např. odporu, indukčnosti, napětí apod.

Potenciometr je snímač odporový, který se skládá z odporové dráhy, po níž se posouvá jezdec. Pokud se jezdec pohybuje na otáčivé ose, jedná se o otočný potenciometr.



Obr. 3.11 Schéma otočného potenciometru [25]



Obr 3.12 Osazený Potenciometrický snímač

Odporová vrstva je nejčastěji tvořena vrstvou uhlíku, využití mají však i odporové dráty, vodivý plast či kovová vrstva. Tato vrstva musí mít vhodný podklad, do běžných podmínek postačí plastový nebo z tvrzeného papíru, do podmínek s vysokými nároky keramický. Odporová hmota také může být výliskem z odporového materiálu, nebo vlisována do vhodného podkladního materiálu. Jezdec je obvykle tvořen sadou kovových perků, výliskem z vodivého plastu a podobně. [25]

Soustava takových snímačů je napojena na měřicí ústřednu (**obr. 3.13**) a počítač, který zaznamenává měření několikrát za sekundu. Lze tedy sledovat průběh naměřených hodnot s takřka nulovou časovou prodlevou a obsluha celé aparatury je zabezpečena pouze jedním pracovníkem. Počítač provádí bezprostředně po obdržení naměřených hodnot jejich grafické vynesení, díky tomu lze objektivně kontrolovat průběh deformací, respektive jejich ustálení, a řídit tak předepsaný zatěžovací postup. Přesnost měření závisí na typu zařízení a volbě počátečního nastavení. Obecně lze říci, že čím menší rozsah měření, tím může být větší přesnost.

Elektrické snímače mají řadu výhod, lze jich osadit pod zkoušenou konstrukci potřebné množství (závisí na dispozicích zkušebny), v průběhu zkoušení se obejdou takřka bez obsluhy a jsou schopny zajistit dostatečnou přesnost měření. Frekvence ukládání dat je volitelná, obvykle 5Hz. Lze je využít i na měření šířky trhlin, silových veličin, nebo také k měření rychlých pohybů (dynamické zkoušky). Tyto mechanismy nahradily přístroje mechanické a pro zatěžovací zkoušky mostních konstrukcí jsou velmi využívány a oblíbené. V případě nevhodných terénních dispozic jako jsou velmi hluboká údolí či prudké řeky, kde nelze osadit potenciometrické snímače, je třeba najít vhodnou alternativu měření.



Obr. 3.13 Měřicí ústředna Spider 8 [25]

3.1.4 Optické metody

Jednou z historicky mladších metod měření vzdáleností jsou metody optoelektrické. Tyto metody mají řadu charakteristických rysů a odlišných problémů oproti principům výše uvedeným. Hlavní předností je jejich velký dosah měření při zachování potřebného rozlišení, bezdotykové měření v rychlém sledu a imunita vůči rušení optického paprsku. V kombinaci této metodiky a vhodné výpočetní techniky lze ekonomicky dosáhnout relativně velkých přesností.

Základním principem měření je odraz světelného signálu od měřeného bodu a jeho následné vyhodnocení. Tato metodika se v zásadě dělí na tři zcela odlišné fyzikální principy:

- využití triangulace;
- měření založené na fázovém posuvu;
- technika šíření impulzů.

Tyto metody se neliší jen svou fyzikální podstatou, ale i dosažitelným rozlišením, opakovatelností měření a absolutní přesností.

Princip **triangulace** často využívá světlo převedené na elektrické impulsy. Jako zdroj světla poslouží laserová dioda, rozsah měření je 20 – 400 mm. Povrch měřeného předmětu musí mít odrazivost 6- 90%, měření v praxi je tedy na této vlastnosti takřka nezávislé. Přístroje využívající optické triangulace jsou určeny především do výrobních závodů a průmyslu, pro kontrolu jakosti, určování tvaru, výpočet objemu apod. Pro zatěžovací zkoušky je tato metoda využitelná především v laboratorních podmínkách.



Obr. 3.14 Optoelektrický snímač vzdálenosti [27]

Metoda měření využívající **fázového posuvu** je naopak vhodná pro velké vzdálenosti, její rozsah se pohybuje od 0,2 do 170 m. U všech optických metod však obecně platí, že s rostoucí vzdáleností roste i jejich nepřesnost. Snímače pracující na principu fázového posuvu jsou vyvinuty především pro jeřábové systémy, průmyslové vozíky a podobné logistické aplikace. Přesnost se pohybuje v řádech milimetrů, což je pro měření svislých deformací nedostatečné. [27]

Jako další alternativa pro výše uvedené měřicí systémy se jeví využití **laserových dálkoměrů**, které jsou obvykle založeny na principu šíření impulsů. Jsou to takzvané aktivní dálkoměry využívající vyslané energie, díky které určují hledanou vzdálenost. Laser je tvořen aktivním prostředím, rezonátorem a výbojkou, systém tvorby laserového záření využívá zákonů kvantové mechaniky a termodynamiky. Konkrétní sestavu laserového mechanismu, snímání paprsku a vyhodnocení vzdálenosti je know-how, které si každý výrobce pečlivě hlídá. Tyto přístroje jsou vyvinuty především pro geodetickou praxi, kde mohou ušetřit velké množství času a práce, a také jsou vhodné jako alternativa metru a tzv. *vágrysu* na stavbách. Nejpreciznější přístroje dosahují délkové odchylky 1 mm / 10 m. Pro zatěžovací zkoušky bohužel nebyl tento systém měření vyvinut a i pokud by dosáhl požadované přesnosti, bylo by zapotřebí využít relativně velké množství nákladných snímačů.



Obr. 3.15 Laserový dálkoměr LeicaDisto [29]

Tab. 3.1 Porovnání optoelektrických metod [27]

	Triangulace	Měření fázového posuvu	Šíření impulsů
Dosah	až 10 m	až 200 m	v řádu kilometrů
Přesnost (závisí na době měření a výkonu vysílače)	asi 0,1 % při malém dosahu	v řádech milimetrů nebo přesnější	v řádech milimetrů
Aplikace v průmyslu	určování průměru	systémy nastavování polohy	laserové snímače
Přednosti	jednoduchá a levná instalace, rozlišování několika předmětů	jednoduchá instalace, velká přesnost	velký dosah při zachování velké přesnosti

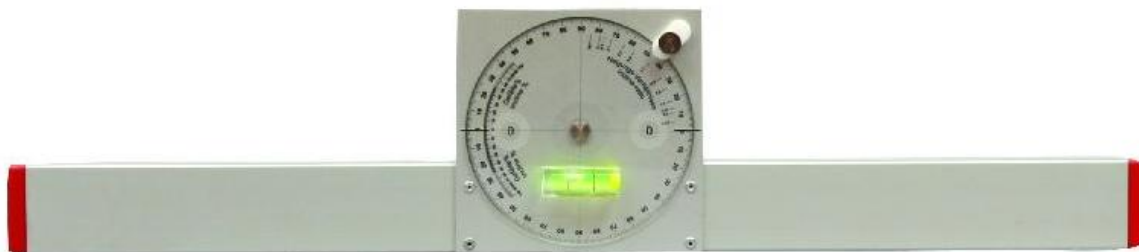
Jak již bylo uvedeno, u optoelektrických metod klesá přesnost s rostoucí vzdáleností. Pro účel zatěžovacích zkoušek jsou tyto metody podmíněně vhodné např. pro urychlení průzkumu konstrukce nebo do laboratorních podmínek. Vzhledem k progresivnímu vývoji elektrotechniky jako takové lze očekávat, že přístroje určené k přesnému měření svislých deformací se na trhu brzy objeví.

3.2 Měření prostorových deformací konstrukce

Prostorovou deformací konstrukce je myšleno především příčné zkroucení mostovky a naklonění podpěr. Pro měření průhybů konstrukce při zatěžování jsou snímače osazeny ve větším počtu v příčném směru. Obvykle jsou to místa na krajích a uprostřed konstrukce. K vyhodnocení příčného naklonění mostovky, především její plastické deformace, poslouží hodnoty získané krajními snímači a lze díky nim vyvodit jednoznačné závěry. Příčná deformace mostovky může být také důsledkem nerovnoměrného sedání podpěr, proto je vhodné vždy doplňovat měření svislých deformací přesnou optickou nivelací a brát na tuto problematiku zřetel. Z každého měření je třeba získat co největší množství informací a na konstrukci nahlížet jako na spojitý mechanismus. Tato kapitola se bude věnovat především **naklonění pilířů**, které nemá rozhodující vliv pro posouzení způsobilosti konstrukce a lze jej tedy charakterizovat jako vedlejší.

Pro vytvoření jakéhosi nadhledu nad konstrukcí a zhodnocení stávajícího stavu pilířů postačí vizuální prohlídka a všudypřítomná *vodováha*. Pokud bude dodržena svislice, postačí kontrolní prohlídka po ukončení zkoušky. Pokud však u některých podpěr svislice dodržena nebude, je třeba takový stav před zkouškou zdokumentovat a během zatěžování sledovat průběh naklánění podpěry. Proces nerovnoměrného sedání a naklánění podpěr je obvykle způsoben nevhodným založením konstrukce.

K nejjednodušším způsobům měření úhlů patří využití sklonoměrů, také zvaných jako klinometry. V dnešní době lze opatřit i vodováhu s digitálním displejem, na kterém lze dokonce volit náklon v procentech, stupních či poměru. Sklonoměrem je opatřený i výše uvedený laserový dálkoměr LeicaDisto (**obr. 3.15**), je tedy zřejmé, že v geodetických a zeměměřičských pomůckách je sklonoměr standardní nástroj. Tyto přístroje jsou cenově dostupné a jejich přesnost k výše uvedenému účelu postačí.



Obr. 3.16 vodováha se sklonoměrem [30]

Bohužel ne vždy lze náklon podpěry určit pouze sklonoměrem. Ať už kvůli přístupu ke konstrukci či pro ověření naměřených hodnot, je vhodné měření doplnit pomocí geodetických metod. Geodézie je universální měřičská metoda, která se zabývá měřením a zobrazováním zemského povrchu a objektů na něm. Vzhledem k tomu, že u každé zatěžovací zkoušky je geodetické měření nezbytné, není problém nechat geodetem ověřit náklon pilířů při zatěžovací zkoušce. V podstatě existuje více geodetických metod, jak lze určit úhel naklonění konstrukce. Nejstarší metodou je využití trigonometrie, která funguje na principu výpočtu trojúhelníků, dále lze využít přesné optické nivelace, totálních stanic, satelitního navigačního systému a podobně. Způsob měření záleží na dispozicích geodetické osádky a je vhodné jej doplnit výše uvedeným sklonoměrem.

3.3 Měření poměrných deformací konstrukce

Jako poměrnou deformaci chápeme měření délkové změny základny ve zvoleném místě tělesa. U zatěžovacích zkoušek mostních konstrukcí lze označit měření poměrných deformací jako měření doplňkové. Hodnoty poměrných deformací obvykle slouží k ověření výpočetních hodnot. Měření provádíme nejčastěji v místech maximálních ohybových momentů, nebo také pro ověření teoretických předpokladů roznášení nápravových tlaků vozidel do mostovky. Pro měření relativních deformací konstrukce využíváme řadu přístrojů, v praxi zvané jako **tenzometry** či **deformetry**.

Princip metody spočívá v určení relativního pohybu přesně vymezeného rozměru konstrukce, tj. hodnota změny původní délky l_0 (základna) o hodnotu protažení/zkrácení Δl , vyvolaného změnou účinku zatížení. Výsledkem měření je velikost poměrného přetvoření:

$$\varepsilon = \Delta l / l_0 \quad (3.2)$$

Výsledná hodnota může být uvedena v jednotkách procent (promilích) či poměrem.

Hodnotu poměrného přetvoření potřebujeme získat především pro aplikaci *Hookova zákona* a výpočet konkrétního napětí v části konstrukce. Tedy:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (3.3)$$

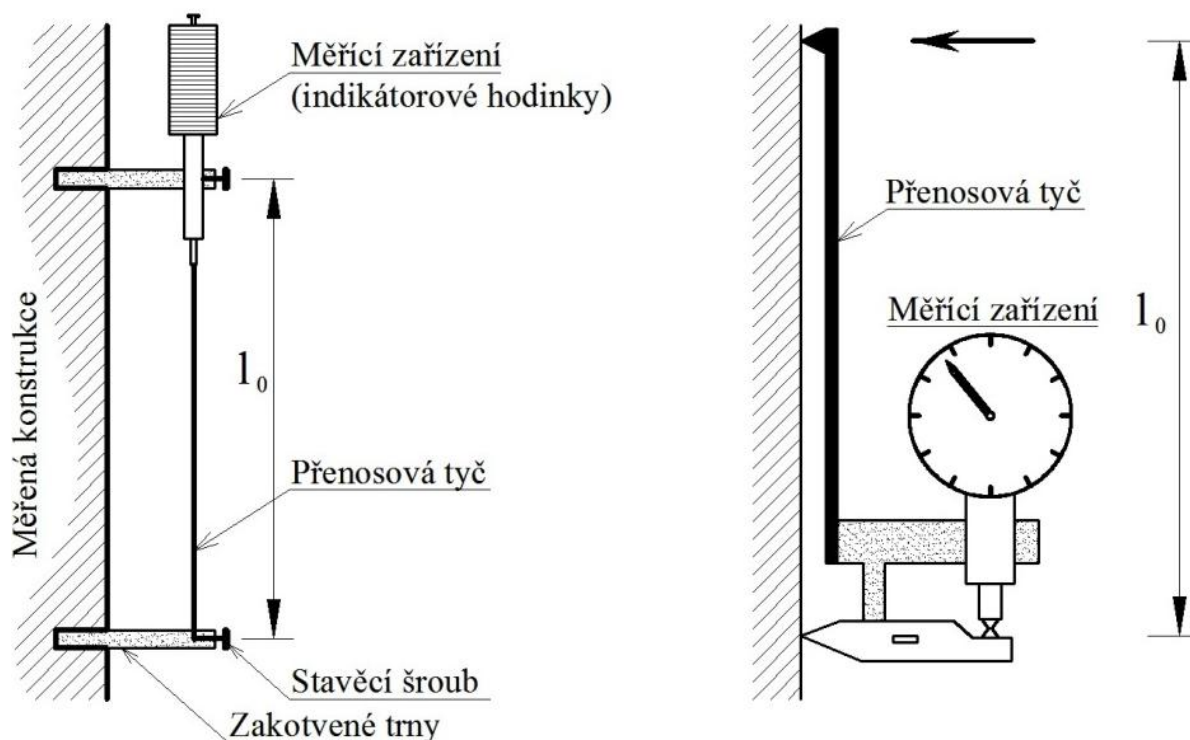
Pro správnou interpretaci výsledků je velmi důležitý modul pružnosti. Vzhledem k tomu, že garance modulu pružnosti čerstvého betonu není standard betonáren na českém trhu, je vhodné jej také změřit podle platných normových předpisů.

Ve stavební praxi jsou běžně užívány tři druhy tenzometrů, mechanické, odporové a strunové. Délka základny se odvíjí od účelu tenzometru, běžně se pro materiály homogenní (ocel) se využívá 3-10 mm, pro materiály nehomogenní pak 50-200 mm. [7]

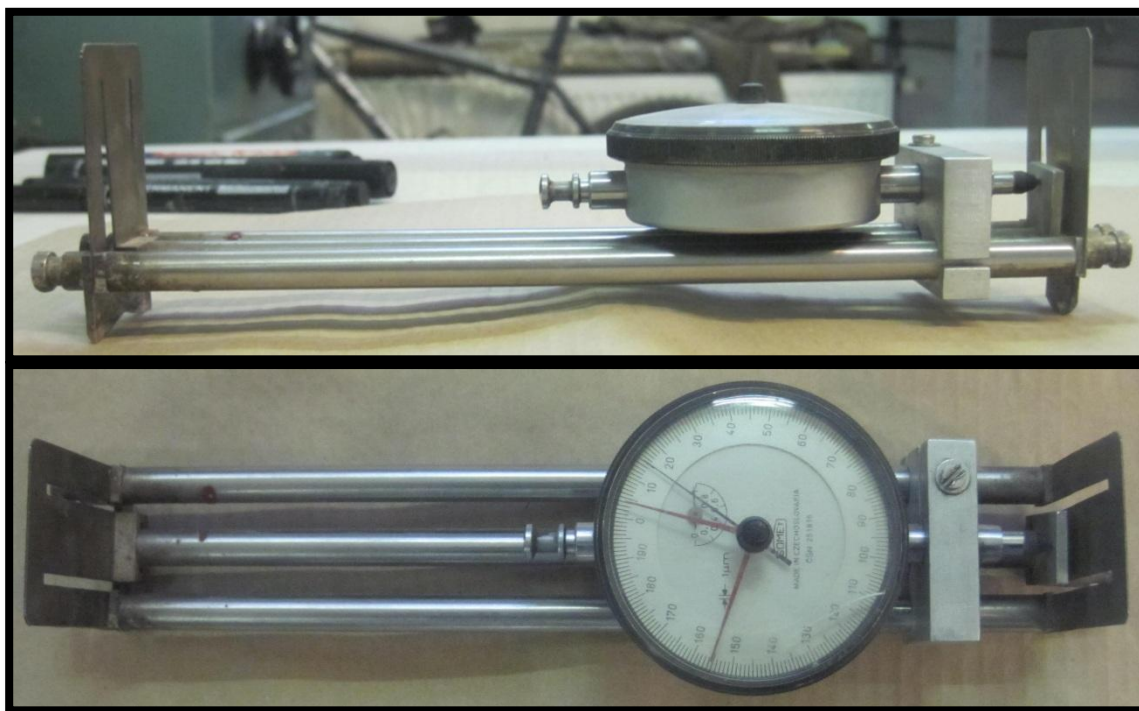
3.3.1 Mechanické tenzometry

Mechanické tenzometry běžně měří poměrnou deformaci přímo, pomocí přesných indikátorových hodinek. U většiny konstrukcí lze indikátorové hodinky nahradit elektornickými snímači posunutí, například odporovými či indukčnostními. Jejich konstrukce se dělí na:

- tyčový tenzometr osazený přímo do konstrukce – pro dlouhodobá pozorování;
- příložný tenzometr;
- příložný můstkový tenzometr.



Obr. 3.17 Schéma tenzometru tyčového/příložného [7]



Obr. 3.18 Příložný můstkový tenzometr

3.3.2 Tenzometry strunové

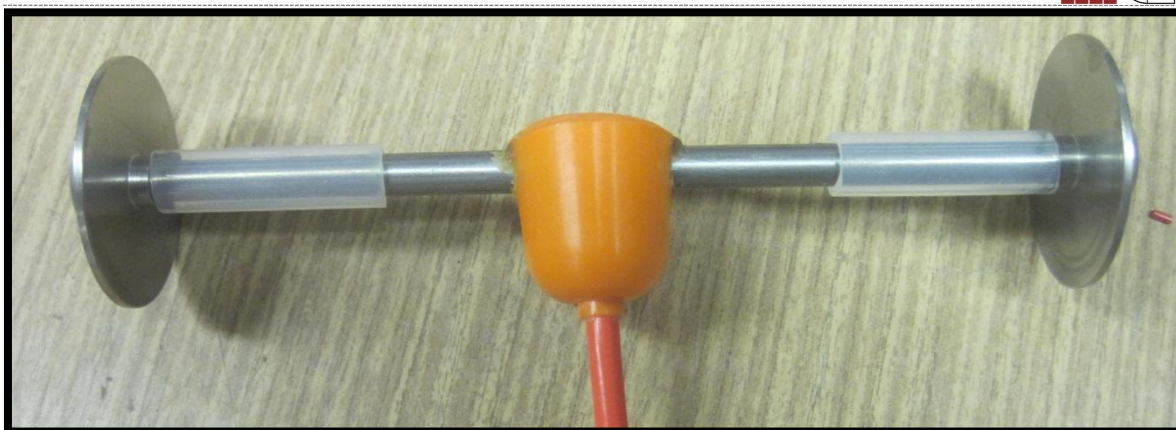
Principem měření poměrných deformací pomocí strunových tenzometrů je snímání změny frekvence vlastních kmitů integrované ocelové struny, v závislosti na změně její napjatosti. Délka struny napjaté mezi dvěma pevnými body tvoří měrnou délku tenzometru l_0 . Frekvence kmitání struny je dána vztahem:

$$f = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{\sigma}{\rho}} = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{E \cdot \varepsilon}{\rho}} = c \cdot \sqrt{\varepsilon}, \quad (3.4)$$

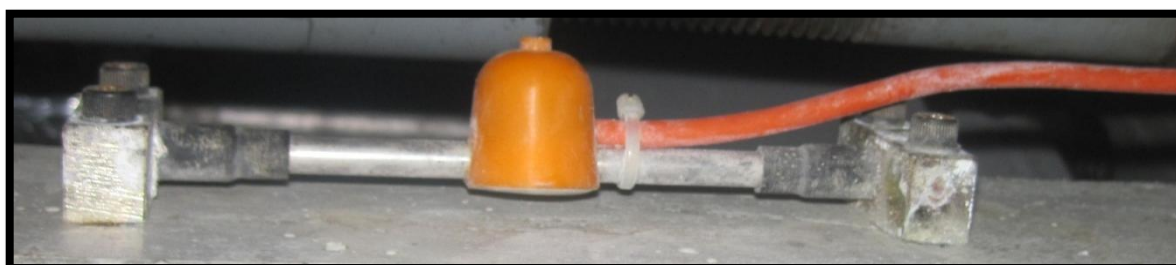
kde: l je délka struny
 E modul pružnosti materiálu struny
 ρ měrná hmotnost materiálu struny
 σ, ε napětí a deformace struny

Podobně jako u tenzometrů mechanických, i strunové se dělí pro různá ukotvení na:

- tenzometry přímo zabetonované do průřezu (**obr. 3.19**);
- pro uchycení na výztuž;
- příložné tenzometry pro ocelové a betonové konstrukce (**obr. 3.20**).



Obr. 3.19 Strunový tenzometr určený k zabudování do konstrukce



Obr. 3.20 Strunový tenzometr osazený na konstrukci

3.3.3 Tenzometry elektronické

Elektronické tenzometry se konstrukčně dělí na dva základní druhy, tenzometry příložené a tenzometry pro přímou aplikaci na povrch zkoušené konstrukce (zalití do betonu, nalepení).

Příložené tenzometry, tzv extenzometry, pracují na principu měření pohybu dvou vzájemných vymezovacích břitů a převodů tohoto pohybu na vhodný elektrický signál. Snímače převádějící pohyb mohou být buď odporové, indukční, kapacitní nebo piezoelektrické. Příložené tenzometry mají dostatečnou citlivost a jejich mechanický princip umožňuje měřit poměrné deformace statického i dynamického charakteru. Měrné délky tenzometrů se pohybují od 10 do 50 mm, jako u všech příložných tenzometrů je třeba měřicí body spolehlivě zafixovat (šrouby, lepené terče). [7]



Obr. 3.21 Lepené terče pro příložený tenzometr

Odporové tenzometry se upevňují výhradně lepením na povrch. Jsou to velice citlivé přístroje, které za nízké pořizovací náklady lze aplikovat v různých oblastech inženýrské praxe. Princip je založen na nepřímém měření relativní deformace, kde mechanicko-elektrický snímač převádí deformaci na změnu svého elektrického odporu. Běžné materiály pro snímače jsou např. kovový drátek (pásek), napařená vrstva či polovodičové vlákno. Pro správnou funkci odporových tenzometrů hrají velkou roli teplotní vlivy, pokud je tedy mechanismus upevněn na povrchu konstrukce vystaveném teplotním výkyvům, je vhodné jej opatřit krytkou tak, aby tenzometr měl co možná nejblíží povrchovou teplotu jako měřená konstrukce. [7]



Obr. 3.22 Nalepený odporový tenzometr

Základním principem **indukčních snímačů** je změna polohy cívek, nebo jejich elektrických vlastností, vyvolaná neelektrickým působením. V podstatě jde o zasouvání či vysouvání feromagnetického jádra uvnitř cívky. Tímto způsobem dojde ke změně indukčnosti cívek a také celkového proudu protékajícího obvodem. Obecně může být cívka tvořena feromagnetickým popř. neferomagnetickým elektricky vodivým jádrem. Parametry cívky závisí na počtu závitů, elektrických a magnetických vlastnostech a na rozměrech. Provedení snímačů lze rozdělit na jednoduché, diferenciální, s výstupním signálem spojitým nebo nespojitým. Indukční snímače také vykazují odporové a kapacitní parazitní vlastnosti, které jsou pro mechanismus nežádoucí.

Tyto snímače byly vyvinuty pro dlouhodobé využívání v agresivních a výbušných provozech v chemickém průmyslu. Mezi hlavní přednosti indukčních snímačů patří vysoká mechanická odolnost, využití v extrémních podmínkách, odolnost vůči zkratování a velká životnost. Tyto mechanismy jsou schopny zaznamenávat teplotu, tlak, výšku hladiny či otáčky. Pro měření deformací se využívají snímače s malou vzduchovou mezerou s otevřeným obvodem, které mají rozsah měření 3 μm – 100 mm. [9] Bohužel je tento

princip měření na českém trhu uzpůsoben především pro průmysl a výzkum, pro měření deformací při zatěžovacích zkouškách mostních konstrukcí se upřednostňují snímače potenciometrické. Metoda je vhodná alternativa pro strunový či odporový tenzometr, nebo pro měření šířky trhlin.



Obr. 3.23 Samotný indukční snímač



Obr. 3.24 Osazený indukční snímač



Obr. 3.25 Indukční snímač osazený k měření pohybu trhliny

4. Vyhodnocení zatěžovací zkoušky

V červenci roku 2012 proběhla v obci Martinice u Velkého Meziříčí statická zatěžovací zkouška mostní konstrukce přes jednokolejnou železniční trať na základě objednávky starosty obce. Zhotovitelem zkoušky byl Ústav stavebního zkušebnictví, Fakulty stavební VUT v Brně. Účelem zkoušky bylo ověření maximálního povoleného zatížení mostní konstrukce.

4.1 Popis konstrukce

Spodní stavba mostu je tvořena dvěma betonovými opěrami na koncích mostu, a dvojicí nosných železobetonových pilířů. Vodorovná nosná konstrukce je složena ze dvou spojitých železobetonových trámů, opatřených náběhy nad pilíři. Trámy jsou spojeny soustavou příčníků, mostovka je železobetonová deska. Statický systém konstrukce je spojitý nosník o třech polích. Vozovkový kryt je tvořen žulovými kostkami se zábradlím na okrajích mostu.



Obr. 4.1 Zkoušená mostní konstrukce

4.2 Popis měření

Při zatěžovací zkoušce byly provedeny tyto zatěžovací stavy:

- ZS1 přejezd vozidla
- ZS2 maximální zatížení středního pole
- ZS3 soustředěné zatížení v oblasti levé krajní podpory.

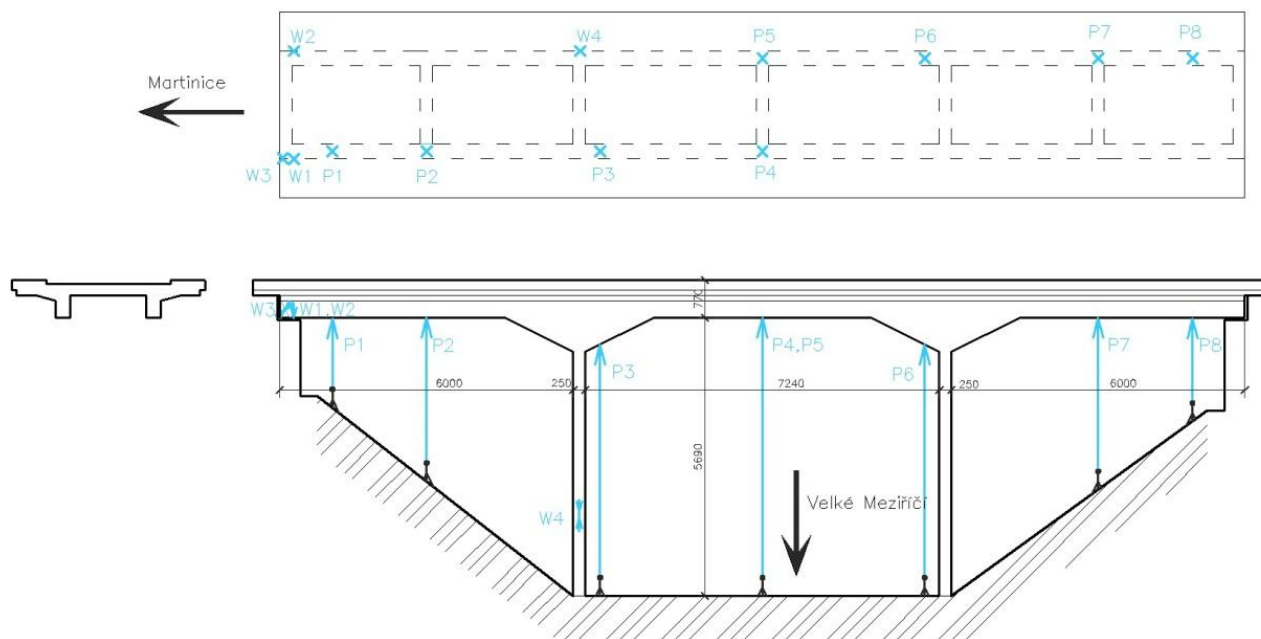
Druhý zatěžovací stav sloužil k vyhodnocení zatěžovací zkoušky, třetí zatěžovací stav k monitoringu trhliny v oblasti levé podpory. Vertikální průhyby byly měřeny potenciometrickými snímači dráhy P1-P8. Dále byly měřeny indukčními snímači svislé posuny

nosných trámů vůči opěrám, monitoring stávající trhliny a monitoring přetvoření jednoho z pilířů (W1-W4, **obr. 3.24, obr. 3.25**).

Potenciometrické snímače byly osazeny na kovových stativích pod měřenou konstrukcí, průhyb konstrukce byl snímán pomocí pohybu závěsného invarového závěsného drátu. Všechny snímače byly napojeny na měřicí ústřednu HBM Spider8 osazenou u levé podpěry, pro archivaci průběhu vertikálních deformací byly nastaveny frekvence ukládání dat 10Hz (ZS1) a 2Hz (ZS2, ZS3).



Obr. 4.2 Osazené potenciometrické snímače



Obr. 4.3 Schématický nákres rozmístění osazených snímačů

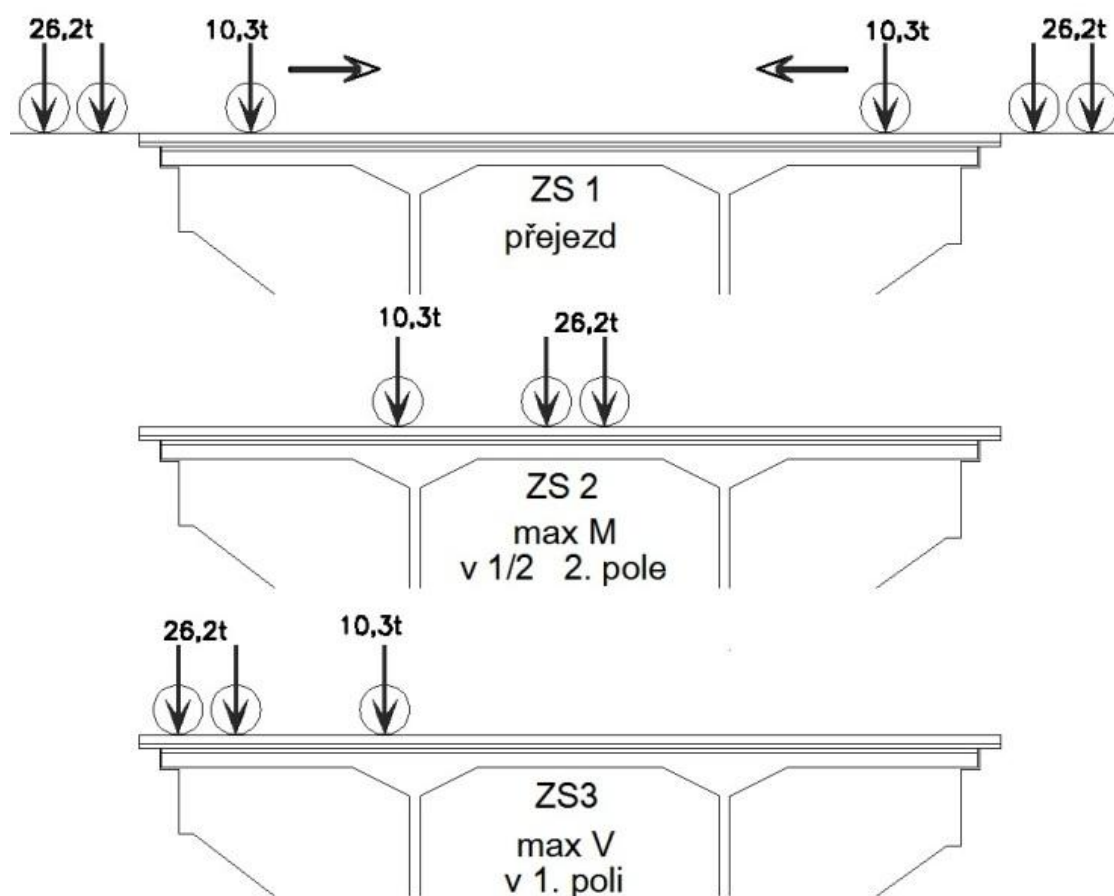
4.3 Zatěžovací sestava

Pro ověření spolehlivosti mostní konstrukce byla požadována hodnota zatížení 30 tun. Jako zatěžovací prostředek bylo opatřeno třínápravové nákladní vozidlo MAN, určené pro přepravu sypkých materiálů. Přední náprava vyvodila silový účinek 10,3 tuny, dvojice zadních náprav 26,2 tuny.



Obr. 4.4 Zatěžovací prostředek – nákladní vozidlo MAN

4.3.1 Rozmístění břemen při jednotlivých zatěžovacích stavech

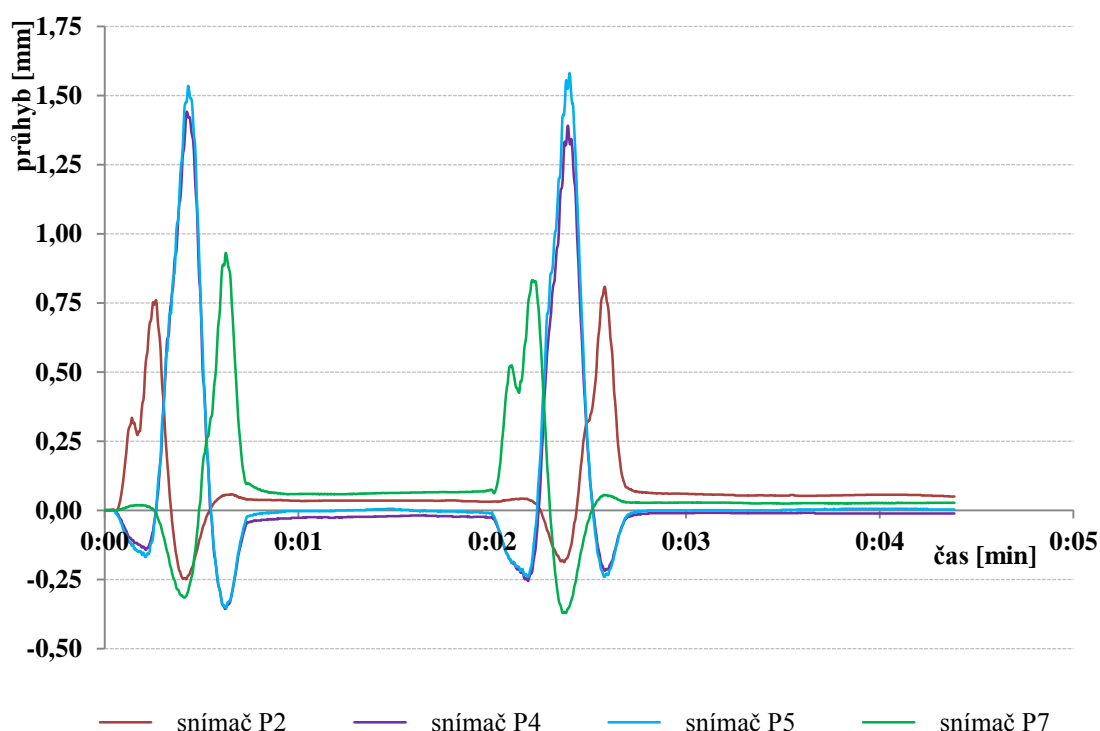


Obr. 4.5 Schéma rozmístění břemen

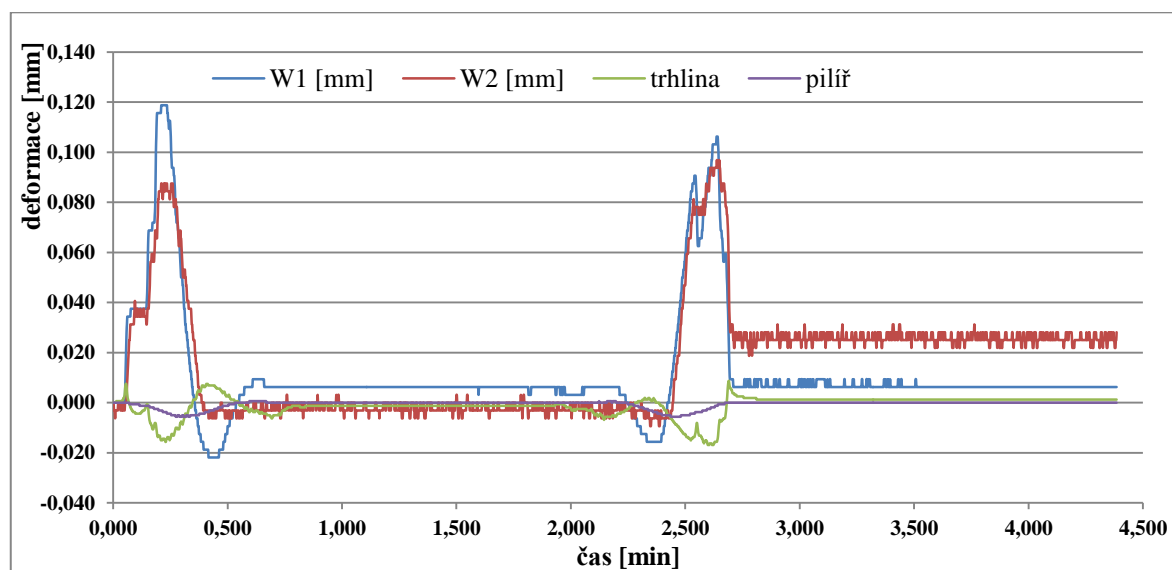
4.4 Vyhodnocení zatěžovací zkoušky

4.4.1 ZS1

Při prvním zatěžovacím stavu (ZS1) byl opatřen záznam vertikálních deformací při obousměrném přejezdu nákladního vozidla celkové hmotnosti 36,5 t. V grafu 9.1 jsou zobrazeny hodnoty svislých deformací uprostřed levého krajního pole (P2), uprostřed středního pole (P4, P5), uprostřed pravého krajního pole (P7). Hodnoty jsou upraveny o vliv poklesů podpor.



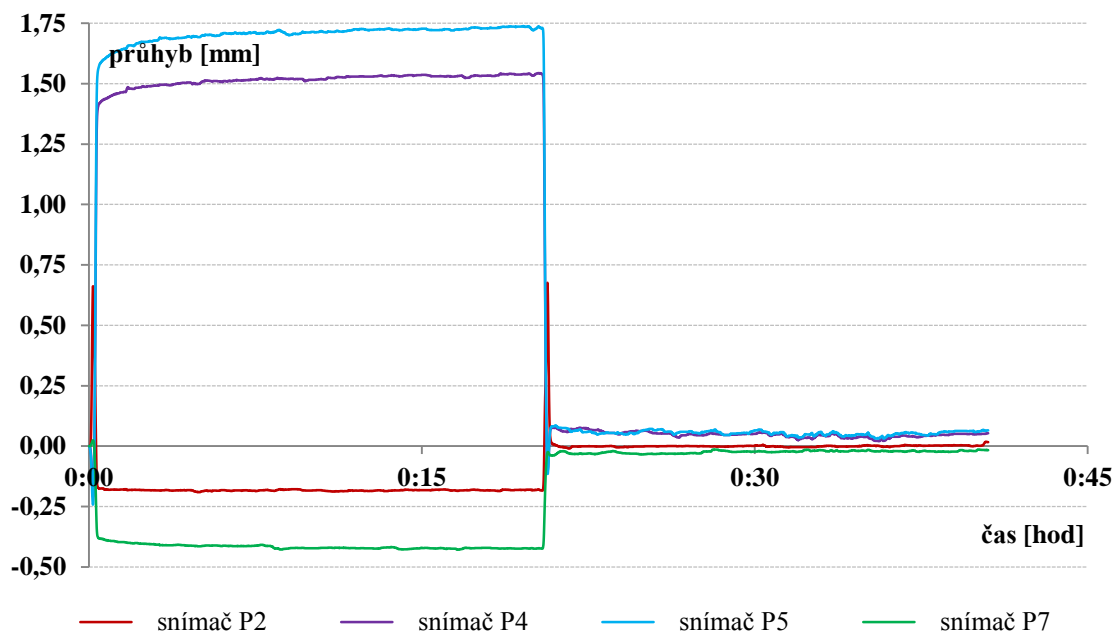
Graf 4.1 Průběh svislých deformací naměřených při přejezdu



Graf 4.2 Naměřené hodnoty indukčních snímačů při přejezdu

4.4.2 ZS2

Druhý zatěžovací stav je rozhodující pro vyhodnocení zatěžovací zkoušky, nákladní vozidlo bylo umístěno v poloze uprostřed rozpětí středního pole tak, aby vyvozovalo maximální ohybový moment. Zkouška bude vyhodnocena na základě naměřených hodnot svislých deformací – graf 9.3. Hodnoty jsou opět upraveny o pokles podpor.

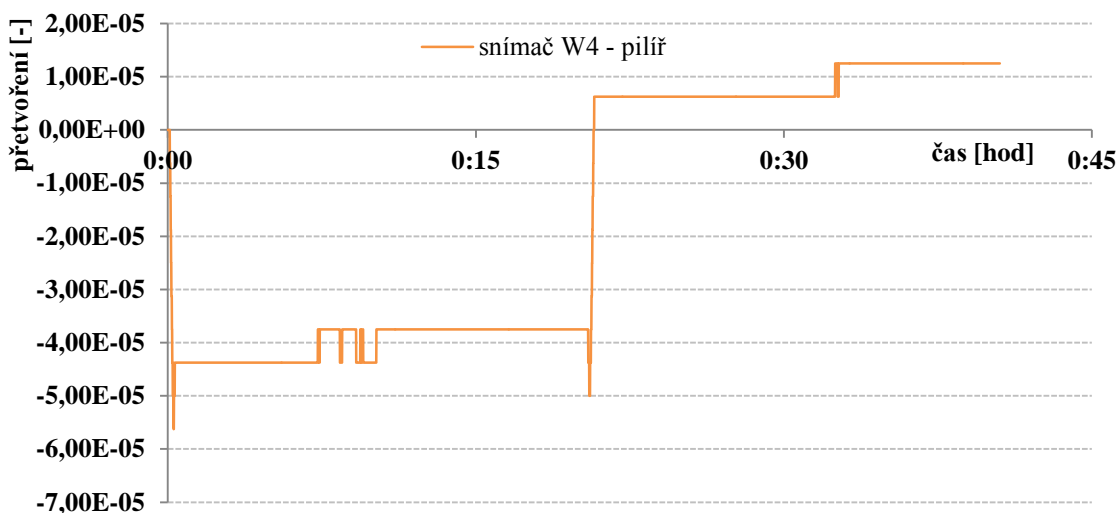


Graf 4.3 Hodnoty svislých deformací uprostřed rozpětí všech tří polí

Tab. 4.1 Vyhodnocení statické zatěžovací zkoušky

Měřený průhyb	Zatěžovací účinky			Deformace		Vyhodnocení		
	Minimální hodnota	Skutečná hodnota	Součinitel spolehlivosti	Celkový průhyb při $Q_{d,max}$	Trvalá deformace po odtížení	Součinitel trvalé deformace	Požadovaný souč. trv. def.	Kritérium spolehlivosti
	$Q_d[t]$	$Q_{d,max}[t]$	$\gamma_{exp,dmax}$	$S_{tot}[mm]$	$S_r[mm]$	$\alpha_{3,exp}$	α_3	$\alpha_{3,exp} < \alpha_3$
P2	24	26,2	1,092	-0,181	0,016	-0,088	0,125	vyhoví
P4				1,538	0,053	0,037	0,125	vyhoví
P5				1,735	0,065	0,034	0,125	vyhoví
P7				-0,424	-0,017	0,037	0,125	vyhoví

- Součinitel spolehlivosti zatížení – únosnost pro zvolenou sestavu zatížení, dle ČSN 73 2030, čl. 6.3 $\gamma_{exp,dmax} = Q_{d,max} / Q_d$.
- Součinitel trvalé deformace je poměrem mezi trvalým a celkovým přetvořením.
- Součinitel přípustné trvalé deformace pro stávající nepřestavované mostní objekty, viz kap. 2.6 (Tab.A1, příloha A, ČSN 73 6209).
- Kritérium spolehlivosti viz kap. 2.6.

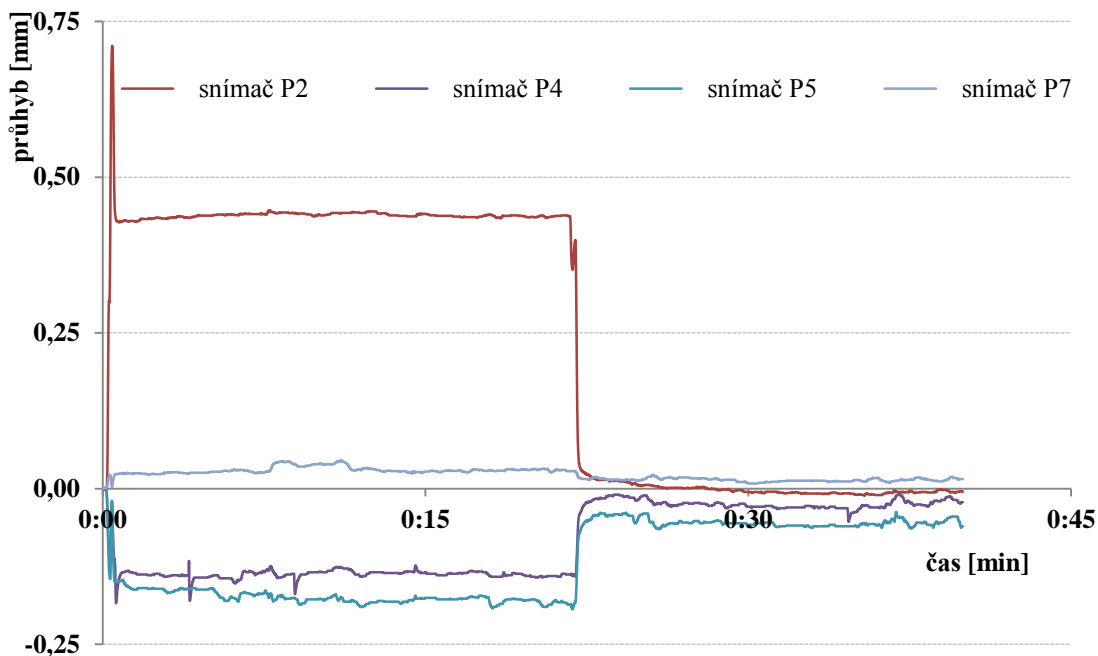


Graf 4.4 Průběh poměrného přetvoření na nosném pilíři

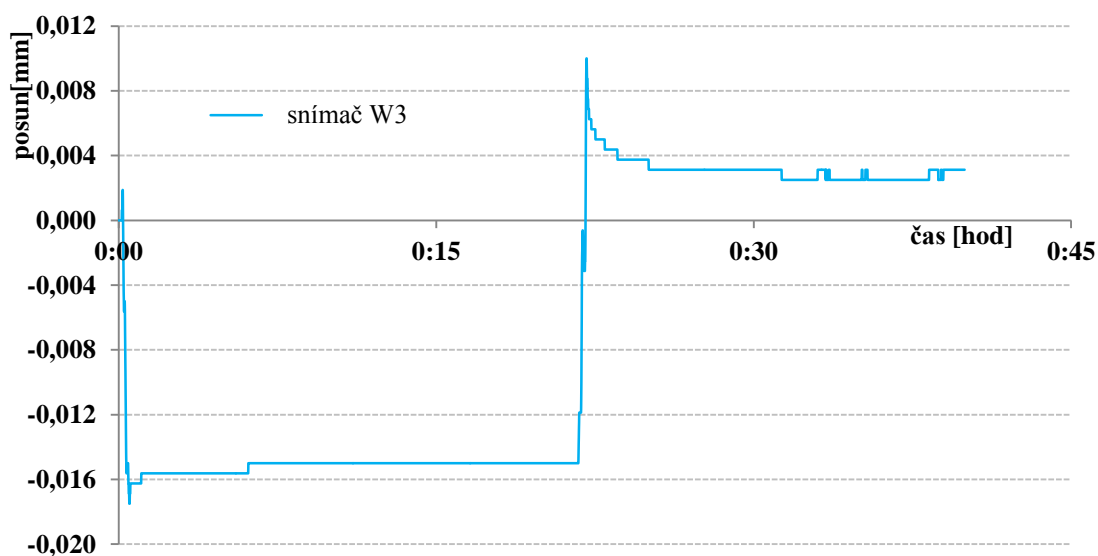
Na základě průběhu poměrného přetvoření na nosném pilíři (graf 4.4) a při uvažovaném modulu pružnosti betonu $E_b = 28 \text{ GPa}$ byla zjištěna změna napjatosti v betonu o 1,6 MPa. Tuto hodnotu lze považovat za nevýznamnou z hlediska napjatosti betonu.

4.4.3 ZS3

Účelem třetího zatěžovacího stavu bylo vyvodit maximální napětí v místě stávající trhliny v oblasti levé podpory a ověřit její chování (rozevírání a zavírání).



Graf 4.6 Hodnoty svislých deformací uprostřed rozpětí všech tří polí



Graf 4.7 Pohyb trhliny při třetím zatěžovacím stavu

4.5 Shrnutí zatěžovací zkoušky

- Posuzovaná mostní konstrukce **vyhovuje** v měřených místech při působení statického zatížení o maximální předepsané hodnotě nepřesahující 30 tun dle požadavků ČSN 73 6209 z hlediska trvalé deformace a poškození trhlinami.
- Naměřené hodnoty pohybu trhliny při jednotlivých zatěžovacích stavech se pohybují v rozmezí do 0,02 mm, lze je tedy prohlásit za bezvýznamné a neohrožující statickou funkci konstrukce.
- Na základě hodnot poměrných přetvoření naměřených při ZS2 snímačem W4 bylo vypočítáno napětí ve sloupu 1,6 MPa, což lze považovat za hodnotu bezvýznamnou z hlediska tlakového napětí v betonu.

5. Problematika závěsných drátů

Jak již bylo uvedeno v kapitole 3.1.2, závěsné dráty slouží k přenosu hodnoty svislé deformace konstrukce do snímacího mechanismu. Dráty musí být upevněny ze spodního konce zkoušené konstrukce a opatřeny závažím tak, aby bylo po délce drátu dosaženo vhodné napjatosti. Díky takovému zavěšení se z drátu stává pružný element do jisté míry vzdorující pohybu větru a přenášející deformaci konstrukce svým vlastním pohybem.

5.1 Faktor chyby závěsných drátů

Ideálním měřením pomocí závěsných drátů rozumíme takový stav, při kterém je deformace konstrukce přenesena do měřícího aparátu bez jakéhokoliv zkreslení. Při využití závěsných drátů se na přenosu skutečné deformace podílí chyba způsobená protažením drátu vlivem teploty, zkreslení deformace vlivem působení větru, protažení drátu v čase a nedodržení svislice mezi měřeným bodem a měřícím zařízením.

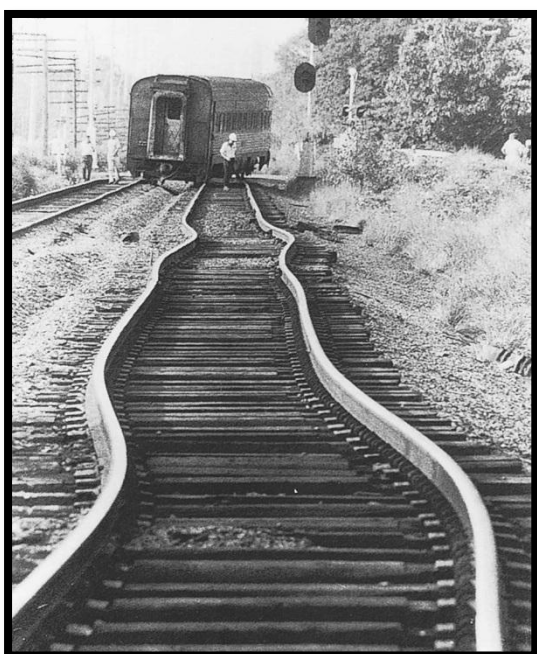
Problematikou chyby při nedodržení svislice a její velikosti při reálném měření se zabýval Ing. Hvozdenský ve své diplomové práci. Velikost chyby se odvíjí od rozměrů trojúhelníku, tvořeného měřícím bodem, jeho půdorysným průmětem a skutečnou polohou měřícího zařízení. Otázka je, jak daleko od svislice je osazen snímač. [8] V praxi je samozřejmě snaha svislici dodržet, bohužel tento požadavek nelze splnit vždy, neboť je místo osazení snímače ovlivněno terénními dispozicemi pod mostem.

Velikost chyby způsobené větrnou aktivitou se odvíjí od rychlosti větru a průměru a délky drátu. Tato chyba způsobená vodorovným pohybem napjaté struny vede ke snížení hodnoty skutečné deformace konstrukce a bývá obvykle určována odhadem. Pokud je zkoušená konstrukce vysoko nad terénem a délka závěsného drátu velká, je třeba brát ohled na aktuální rychlost větru. Bohužel nelze vždy přesně odhadnout kmitání drátu způsobené třením větru. Prakticky lze nepřesnost eliminovat osazením snímačů dříve, než dojde k samotnému zatěžování a změřením konkrétních hodnot deformace drátů způsobené větrem. V případě velkých naměřených hodnot se provede korelace výsledků o toto měření. Pokud by došlo k většímu přetížení použitého drátu (běžné závaží má hmotnost 0,5 Kg), lze tvrdit, že vzdor vůči pohybu větru bude větší a chyba se tím částečně eliminuje. Vzniká ale otázka, jakým způsobem se struna přetvoří a do jaké míry se projeví chyba způsobena tímto vlivem.

Teplotní roztažnost závěsu závisí především na jeho materiálovém složení a výkyvu okolních teplot, je to hodnota, kterou lze snadno spočítat a chyba se dá eliminovat použitím

vhodného materiálu. Do výpočtu reálného protažení drátu vstupuje jeho délka, součinitel tepelné roztažnosti a výkyv okolní teploty. Reálně na drát ještě působí vliv jeho částečného oslunění, a fakt, že slunce nemusí svítit na všechny závěsy. Teoretický výpočet nemusí tedy korespondovat se skutečnou deformací drátu. V diplomové práci pana Ing. Hvozdenského bylo ověřeno chování dvou druhů ocelových drátů a vláken Dyneema v závislosti na teplotních vlivech. Tato kapitola je věnována různým druhům závěsů a výzkumu jejich průtažnosti při simulaci zavěšení.

5.1.1 Koeficient teplotní roztažnosti



Obr. 5.1 Absbury Park, New Jersey [6]

Teplotní roztažnost je charakteristickou vlastností všech materiálů, vyvolávající objemové změny v závislosti na změnách teplotních. Tohoto fyzikálního jevu využívá řada mechanismů a výrobních procesů ke své účinnosti, např. teploměry. Naopak nejen v případě závěsných drátů je faktor teplotní roztažnosti nežádoucí (**obr. 5.1**). Pro popis chování závěsných drátů postačí lineární teplotní roztažnost, která závisí na délce drátu, rozdílu teplot a součiniteli teplotní roztažnosti. Tedy jestliže teplota T zavěšené struny vzroste o teplotu ΔT , její původní délka l_0 se protáhne o Δl .

$$\Delta l = l_0 \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad (5.1)$$

Kde α je teplotní součinitel délkové roztažnosti. Její jednotkou je K^{-1} a její hodnota je závislá na materiálu. Vzorec 4.1 lze přepsat do tvaru:

$$\alpha = \frac{\Delta l / l_0}{\Delta T} \quad (5.2)$$

Ze vzorce je vidět, že α je poměrný relativní přírůstek délky při jednotkové změně teploty. Pro většinu materiálů se koeficient mění s teplotou (má rostoucí charakter s rostoucí teplotou), ve většině případů se však uvažuje konstantou. Teplotní roztažnost pevných látek je v podstatě objemová změna projevující se ve všech třech rozměrech. Vzhledem

k poměru délky a profilu závěsného drátu budeme tuto vlastnost uvažovat za lineární a vliv příčných objemových změn bude zanedbán. [6]

Tab. 5.1 Přehled teplotních roztažností běžných materiálů [6]

LÁTKA	$\frac{\alpha}{10^{-6}/^{\circ}\text{C}}$	LÁTKA	$\frac{\alpha}{10^{-6}/^{\circ}\text{C}}$
Led (0°C)	51	Ocel	11
Olovo	29	Sklo	9
Hliník	23	Diamant	1,2
Mosaz	19	Invar	0,7
Měď	17	Tavený křemen	0,5
Beton	12	Aramid	-2

5.1.2 Výpočet teoretické chyby

Pro ilustraci bude uveden teoretický výpočet chyby přenosu deformace invarovým drátem. Ve výpočtu budou využity zkušenosti ústavu aplikované mechaniky VŠKG z Brna. Délka struny bude uvažována 25 m, součinitel tepelné roztažnosti drátu $\alpha = 0,7 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$.

Pro 25m dlouhý drát je hodnota protažení:

$$\delta_{yt}/\Delta t = 0,0175 \text{ mm}/^{\circ}\text{C}$$

V případě výkyvu teplot v rozmezí 3°C během zatěžování bude:

$$\delta_{yt} = 0,0525 \text{ mm}$$

Experimentálně ověřené protažení drátu vlivem jeho napjatosti a poddajnosti:

$$\delta_{ym} = 0,1 \text{ mm}$$

Vliv kmitání drátu při průměrné rychlosti větru $v = 5 \text{ km/h}$:

$$\delta_{yv} = 0,18 \text{ mm}$$

Nepřesnost snímače dráhy:

$$\delta_{ys} = 0,02 \text{ mm}$$

Všechny výše uvedené chyby lze považovat za nahodilé a nezávisle působící, to znamená, že střední chyba bude spočtena:

$$\delta = \sqrt{\delta_{yt}^2 + \delta_{ym}^2 + \delta_{yv}^2 + \delta_{ys}^2} = \sqrt{0,05^2 + 0,1^2 + 0,18^2 + 0,02^2} = 0,21 \text{ mm}$$

Této hodnotě odpovídá pravděpodobná chyba $\delta = 0,19 \text{ mm}$. Za předpokladu minimálních deformací konstrukce nad 5 mm se dodržení přípustné chyby měření 5% musí pohybovat do 0,25 mm. Požadavek přesnosti měření je tedy splněn, musí se ale respektovat předpokládaný pohyb teploty v rozmezí 3°C a měřit rychlost větru. Díky tomuto výpočtu lze také porovnat vhodnost metody měření například s měřením geodetickým a její ověřit efektivitu pro konkrétní účel.

5.2 Reálné chování závěsných drátů



Obr. 5.2 Rámová konstrukce využitá k experimentu

K ověření reálného chování závěsných drátů různých druhů materiálů a průřezů byla provedena dvě laboratorní měření. Účelem experimentu bylo především zmapovat chování jednotlivých vzorků při přitížení běžně používaným závažím v čase a také při výkyvu teplot, i když jen v menším rozsahu než na konstrukci v terénu. Vliv nedodržení svislice je při měření zanedbán a faktor proudícího větru bohužel simulovat nelze, i když by pak měření mohlo poskytnout zajímavé výsledky.

Hlavním požadavkem na konstrukci, jež drží závěsné dráty, bylo minimální možné přetvoření rámu vlivem kolísání teplot v laboratoři, aby nedocházelo ke zkreslení deformace samotných drátů. Dráty byly tedy zavěšeny na ocelovém rámu pevně vetknutém do podlahy laboratoře. Potenciometrické snímače byly osazeny na spodní části rámu, která tvoří uzavřený celek tak, aby byl

co nejvíce omezen vzájemný pohyb snímače a úchytného bodu. Frekvence snímání pohybu drátu byla nastavena na 0,1 Hz. Samozřejmě nelze zamezit změnám objemu rámové konstrukce vlivem kolísání teplot. Na tento jev však nebude brán zřetel a pro představu bude provedeno srovnání výsledků jednotlivých vzorků s drátem invarovým. Je zřejmé, že invarový drát se také zdeformuje vlivem teploty, skutečnost je bohužel taková, že se žádný z materiálů nejeví jako objemově stálější. Invarový drát bude tedy opatřen puncem etalonu a zkouškou bude prakticky ověřeno „o kolik“ budou ostatní vzorky horší, čili nestálější.

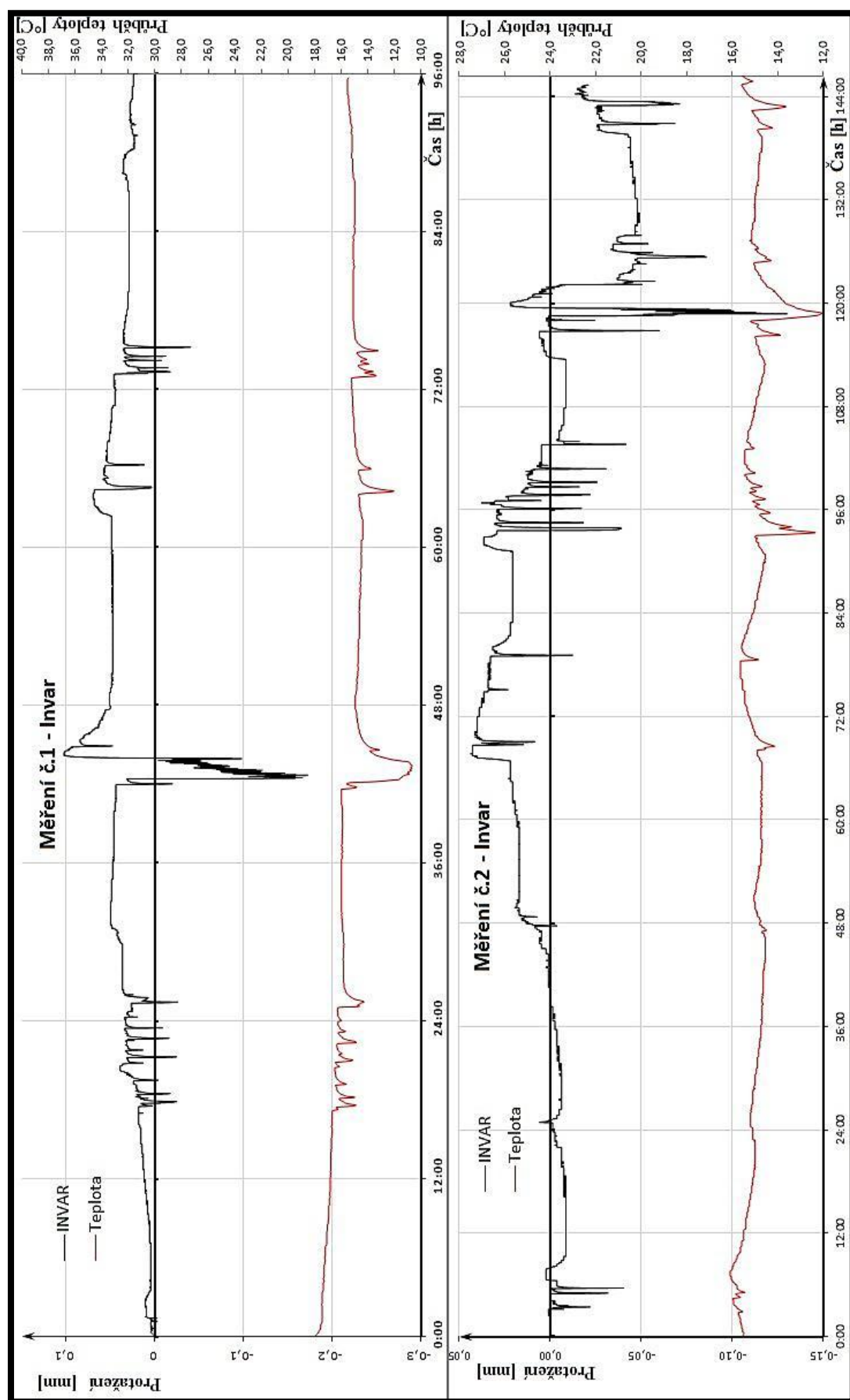
První měření bylo provedeno 26. 10. 2012, trvalo cca 96 hodin a byly při něm použity především průmyslové šicí materiály a rybářské vlasce, včetně invaru a klasického ocelového drátu. Měření druhé bylo provedeno 2. 11. 2012, trvalo cca 144 hodin a byly při něm použity kovové materiály spleteného průřezu. Zbytek této kapitoly bude věnován právě využitým vzorkům při laboratorním měření, jejich popisu a vyhodnocení vhodnosti použití při zatěžovacích zkouškách.

5.2.1 Invar

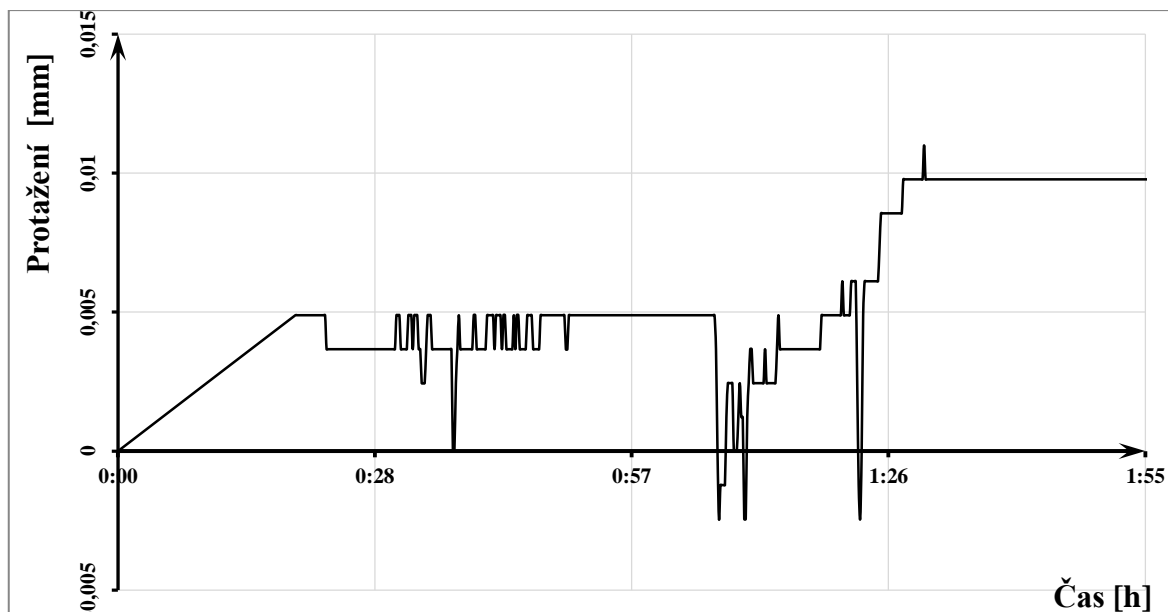
Invar je kovový materiál, složený ze železa a niklu, v poměru 64/36, s malou příměsí uhlíku a chromu. Tato slitina byla vyvinuta švýcarským fyzikem Charlesem Eduardem Guillaumem tak, aby co nejlépe vzdorovala teplotám. Samo slovo invar je zkratkou z latinského *invariabilis* = neproměnný. Invar se používá tam, kde je třeba zachovat tvarovou stabilitu při výkyvech teplot. Najdeme jej například v hodinkách, televizorech či v motorových ventilech.

Pro zatěžovací zkoušky mostních konstrukcí je materiál díky nízké teplotní roztažnosti vhodný. Navzdory malému profilu drátu je manipulace s ním náročnější, neboť je velmi pružný a těžko s ním lze vytvořit očko pouhým ovinutím. Také omotání okolo kladky potenciometru může být velmi problematické, což lze řešit nadstavením spodní části invarového drátu tvárnějším materiálem. Dalším problémem je jeho nedostupnost na českém trhu, díky které vzešel požadavek na hledání vhodných alternativ pro závěsné dráty.

Hodnota koeficientu teplotní roztažnosti invaru se pohybuje od 0,5 do $2 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$, v rozmezí 100°C. Pokud se teplota pohybuje okolo 20°C, lze uvažovat součinitel $\alpha = 0,7 \text{K}^{-1}$, při vyšších teplotách hodnota součinitele rychle vzrůstá. V letech minulých byla hodnota teplotní roztažnosti uvažována striktně $0,5 \text{K}^{-1}$, což sice korektní je, ale teplota drátu se musí pohybovat těsně nad bodem mrazu.



Graf 5.1 Chování invarového drátu v závislosti na teplotě



Graf 5.2 Ustálení počátečního protažení invarového drátu

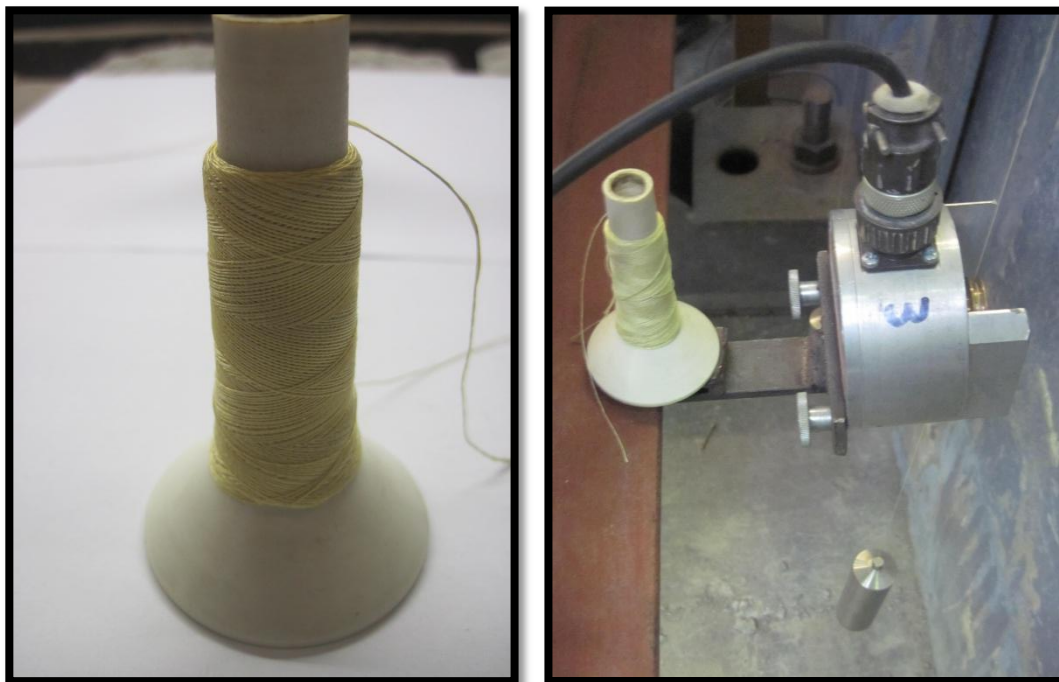
5.2.2 Průmyslové šicí materiály

Při úvahách o vhodných alternativách k invaru vznikla myšlenka využití **aramidových vláken**. Aramid se jako materiál vyznačuje vysokou pevností při nízkých hustotách, je chemicky dobře odolný vůči kyselinám i louhům, degraduje na UV záření za přítomnosti kyslíku. Jak již bylo uvedeno v tabulce 5.1, má záporný koeficient teplotní roztažnosti, což bylo hlavním motivem pro ověření jeho vhodnosti alternativy závěsných drátů. Mimo jiné je aramid využíván na výrobu kevlaru, v leteckém průmyslu či jako alternativa azbestu. Bohužel se s tímto materiálem běžně nepracuje ve formě drátu, díky čemuž jsou možnosti využití velice omezeny. Na českém trhu se podařilo sehnat pouze šicí nitě s obsahem aramidových vláken.

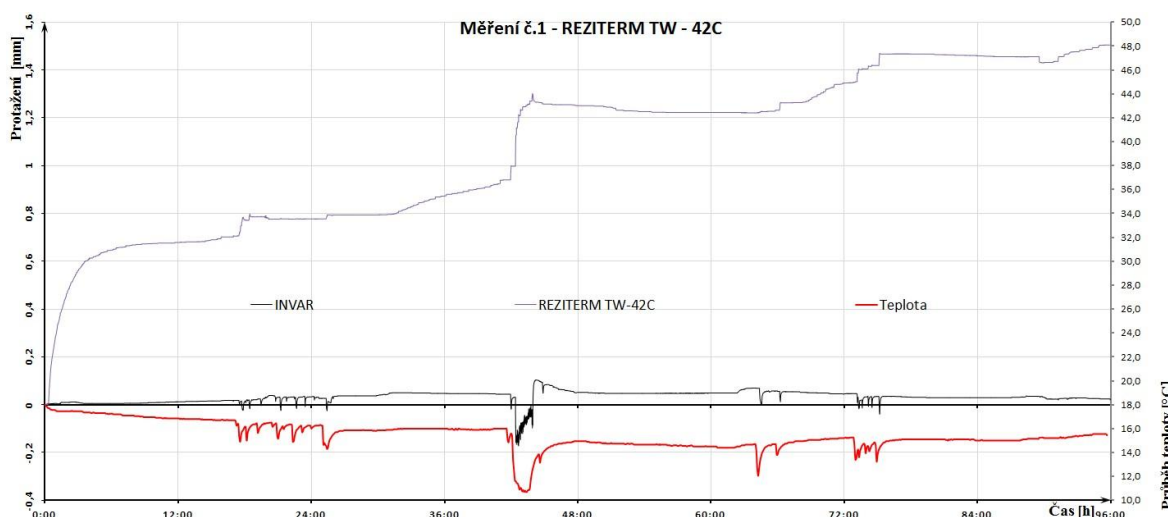
Vzorek **REZITERM TW – 42C** je nití, využívanou pro tkané materiály v chemických provozech. Nit je vyrobena z paraaramidových vláken TWARON, stabilizována krycí vrstvou polyesteru WD 2652 a šicí křemičitou aviváží. Takovýto materiál je velmi odolný vůči kyselinám a zásadám.

Tab. 5.2 Fyzikálně – mechanické vlastnosti vzorku

Jmenovitá jemnost	42 tex	Navlhavost	4,5%
Pevnost v tahu	>60N	Zápalnost	0,29 LOI-Index
Specifická pevnost	1,42N / tex	Teplota destrukce	>400°C
Tažnost	3,4 %	Stabilizační vrstva	Polyester 12 – 18 %
Srážlivost při 190°C	0,1 %	Aviváž	Si olej



Obr. 5.3 Vzorek REZITERM TW – 42C



Graf 5.3 Chování vzorku REZITERM TW – 42C v závislosti na teplotě

Z grafu je patrné, že protažení vzorku roste v čase, což je pro závěsné dráty velice nežádoucí. Dále si lze všimnout rostoucí deformace drátu při klesající teplotě, tento jev potvrzuje záporný součinitel teplotní roztažnosti. Protažení vzorku je nejspíše způsobeno jednak malým profilem nitě, vzdorující tak velkému napětí, a také snahou nitě „rozmotat se“, což lze pozorovat ihned po zavěšení závaží. Pokud by se podařilo sehnat aramidové vlákno většího profilu a plného průřezu, mělo by podobné měření velice zajímavé výsledky. Vzorek REZITERM TW – 42C je pro zatěžovací zkoušky nepoužitelný.

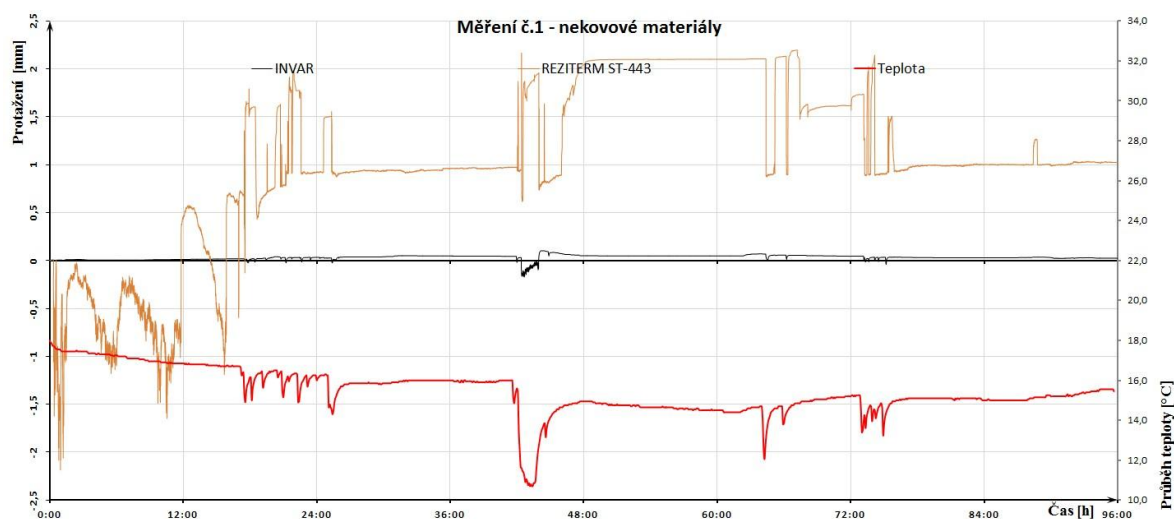
Dalším šicím materiálem použitým při prvním měření je vzorek **REZITERM ST – 433**. Je to nit ze skelných vláken typu EC7 opatřená ochrannou vrstvou polytetrafluoretylenu, který známe pod názvem teflon. Teflonová vrstva slouží niti ke zvýšení chemické odolnosti a zlepšení šicích vlastností. Používá se pro průmyslové tkaniny vzdorující chemikáliím a vysokým teplotám.

Tab. 5.3 Fyzikálně – mechanické vlastnosti vzorku

Jemnost	167 tex	Aviváž	Silikonový olej
Pevnost v tahu	55N	Tažnost	2,3 %
Tepelná odolnost - krátkodobá	350 °C	Specifická délka	6,0 km/kg
Tepelná odolnost – trvalá	300°C	Ochranná vrstva	18 % hmotnosti



Obr. 5.4 Vzorky REZITERM ST a TW



Graf 5.4 Chování vzorku REZITERM ST-433 v závislosti na teplotě

Z grafu 5.4 lze usoudit, že vzorek je velice citlivý na průběh teploty a jeho protažení je ve srovnání s invarem nepřiměřeně velké. Materiál nitě je tak citlivý a křehký, že se při zavěšení přerazal hranou oka na závaží. Vzorek, stejně jako TW – 42C, trpěl na faktor vlastního rozmotávání. Průmyslové šicí materiály bych tedy označil pro zatěžovací zkoušky za nepoužitelné.

5.2.3 Nylon

Nylon je materiál patřící do skupiny syntetických polymerů, často nazývaný jako polyamid. V podstatě jde o vlákno vyrobené z uhlí, vody a vzduchu. Výše zmíněný aramid, stejně jako nylon, vychází z polyamidového základu.



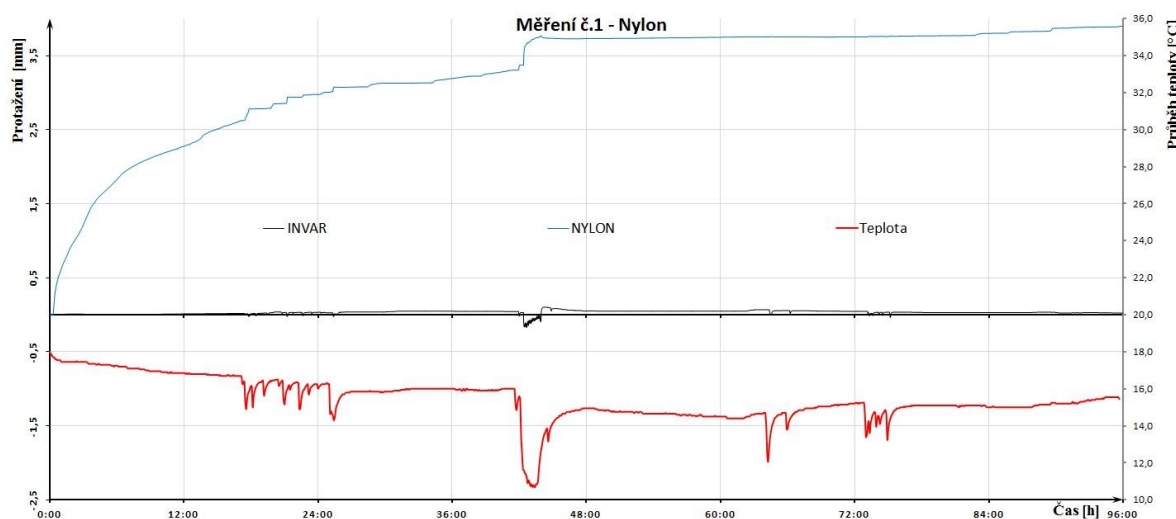
Obr. 5.5 Nylonové punčochy[31]

Původním využitím těchto vláken byly štětinky kartáčů a štětek, v roce 1940 bylo vyrobeno 5 milionů kusů historicky prvních nylonových punčoch (**obr. 5.5**), které byly rozprodány během několika hodin. Materiál se dosud využívá k výrobě vysoce kvalitních punčoch, padákových plachet, výpletů tenisových raket apod. Roku 1941 laboratoři firmy Baťa byl jako reakce na nylon vyvinut československý ekvivalentní výrobek známý jako silon. [31]

Pro experiment byl opatřen nylonový vzorek, původně určený pro navlékání korálů a bižuterie, průřezem má vzorek charakter spletnice. Dle etikety lze soudit že se jedná o materiál pružný, vyrobený na asijském kontinentu (**obr. 5.6**).



Obr. 5.6 Použitý nylonový vzorek



Graf 5.5 Chování vzorku nylonu v závislosti na teplotě

Důvodem prověření chování nylonového materiálu byla především jeho dostupnost, i když bylo od začátku zřejmé, že výsledky nejspíš nebudou uspokojivé. Na grafu 5.5 je patrné, že deformace vzorku je vůči invarovému drátu nepřiměřeně velká. Cca po 48 hodinách se deformace ustálí a je neměnná i navzdory výkyvům teplot. Otázka je, co by způsobil větší teplotní gradient. Chování materiálu po dosažení určité napjatosti (zde po 48 hodinách) je žádoucí, bohužel se v tomto intervalu nevyskytl větší výkyv teploty a nelze odhadnout chování při vyšších (nižších) teplotách. V terénních podmínkách navíc nelze čekat dva dny, než se ustálí protažení závěsné struny. Vzorku opět škodí řez spleteného charakteru, po napnutí je vlákno opravdu tenké. Tento materiál by bylo vhodné vyzkoušet ještě ve větší tloušťce kruhového profilu.

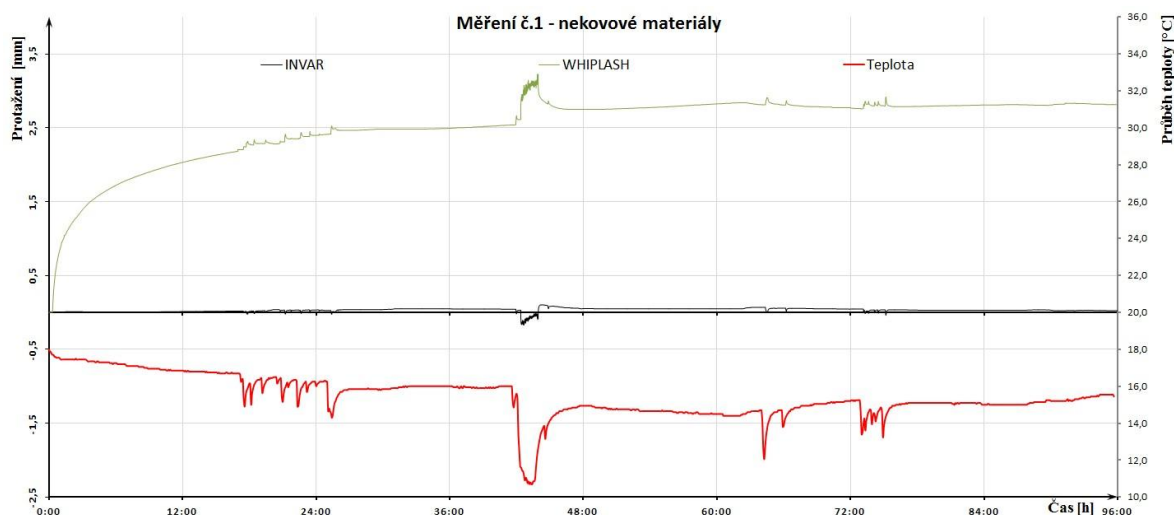
5.2.4 Rybářský vlasec WHIPLASH

Vzorek Whiplash Crystal je rybářský vlasec kruhového profilu (\varnothing 0,15 mm). Nosnost vzorku je 45 liber, což odpovídá cca 19 kg. Výrobce uvádí, že materiál vlasce byl vyvinut tak, aby nebyl spatřen na hladině. Tato vlastnost by mohla být pro závěsy užitečná v případě oslnění jednotlivých drátů. Materiál vzorku je tvořen převážně mikrovlákný Dyneema, bohužel k rybářským vlascům se standardně nedodávají technické listy a jejich přesné materiálové složení je know-how výrobce. Pro představu o charakteru vzorku budou uvedeny hlavní vlastnosti vláken Dyneema.

Dyneema je obchodní značka vysokopevnostního polyethylenového vlákna, využívá se především na šňůry a lana, ochranné pomůcky či chirurgické nitě. Pevnost vlákna v tahu se pohybuje až do 3,7 GPa, je velice odolné vůči většině chemikálií, mikroorganismů a slunečnímu záření. Bohužel rostoucí teplota má velký vliv na chování materiálu, výrobce nedoporučuje jej vystavovat dlouhodobě teplotám větším než 100°C. Materiál také trpí tzv. creepem, což je deformace po dlouhodobém zatížení. [32]

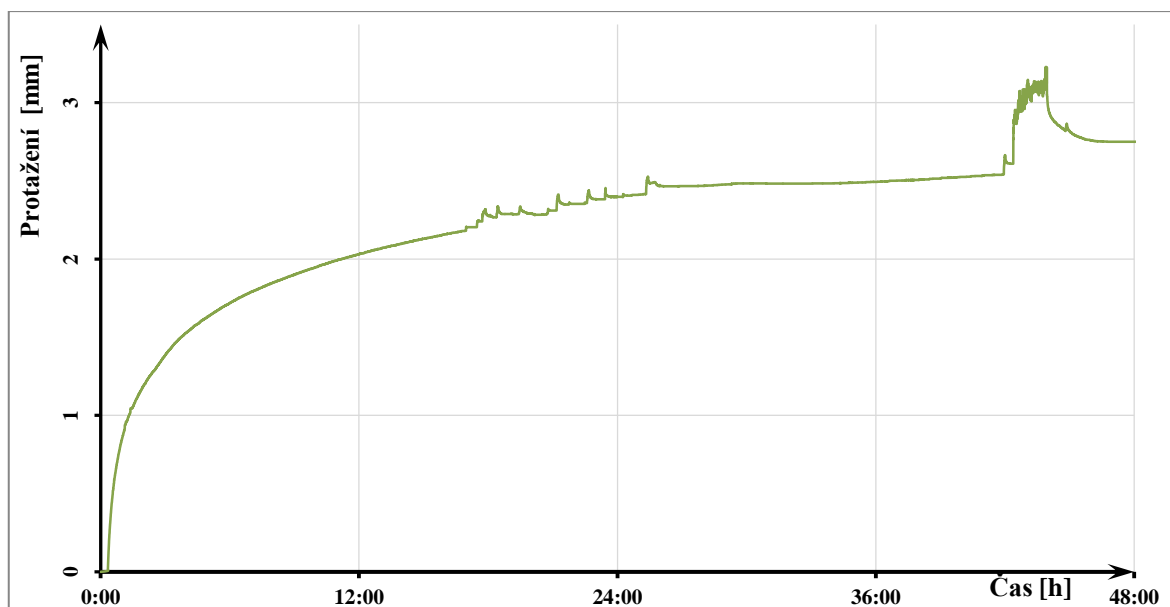


Obr. 5.7 Vzorek WHIPLASH Crystal [33]



Graf 5.6 Chování vzorku WHIPLASH v závislosti na teplotě

V grafu je zřetelně vidět, že vzorek Whiplash, stejně jako vzorky předchozí, má nepoměrně velké protažení oproti invarovému drátu. Je velice pravděpodobné, že všechny výše uvedené vzorky měly zkrátka malý profil a tím menší nosnost, v poměru k závaží (cca 0,5 kg). Právě neúměrně těžkým závažím byla vyvolána velká deformace v čase. Pokud by experiment probíhal se stejnými materiály, ale vzorky větších profilů, měření by přineslo vhodnější závěry. Použitý vzorek Whiplash je tedy hodnocen jako nevhodný pro zatěžovací zkoušky.



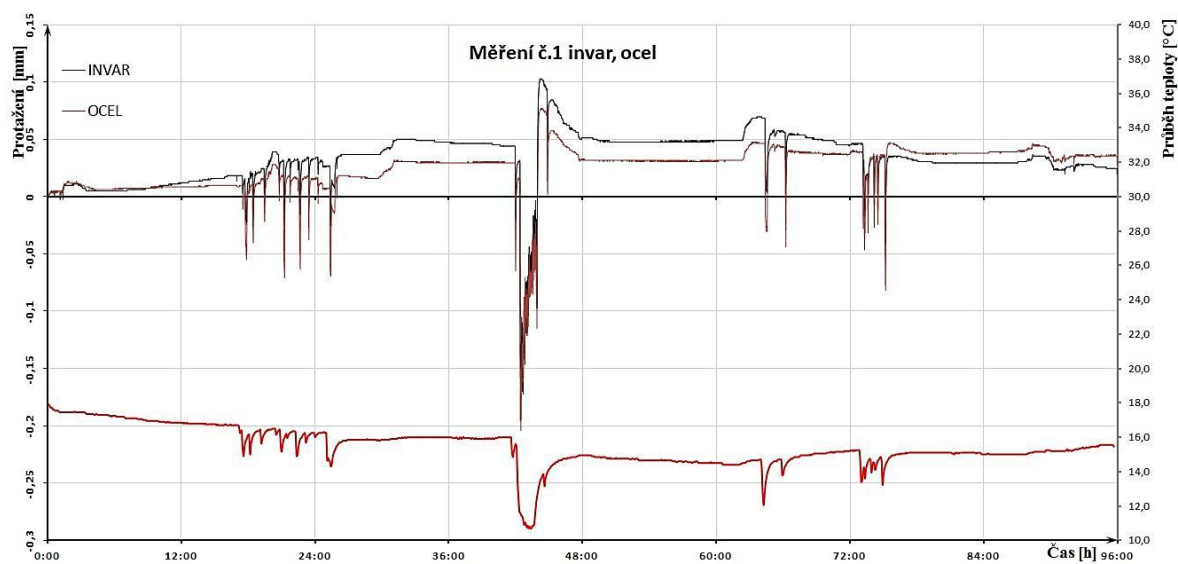
Graf 5.7 Ustálení počátečního protažení vzorku WHIPLASH

5.2.5 Ocelový drát

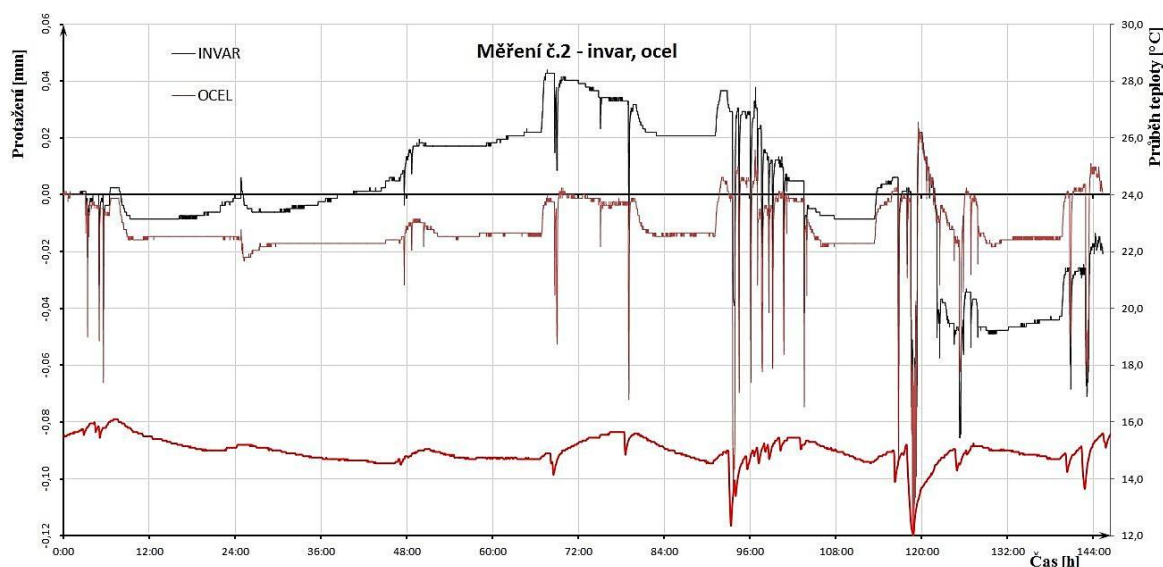
Pro srovnání chování jednotlivých vzorků byl také při experimentu využit klasický ocelový drát, používaný běžně v laboratořích a dílnách. Jeho přesné materiálové složení bohužel neznáme, neboť není využíván ke konkrétním účelům, slouží spíše jako běžná pomůcka.



Obr. 5.8 Cívka použitého ocelového drátu

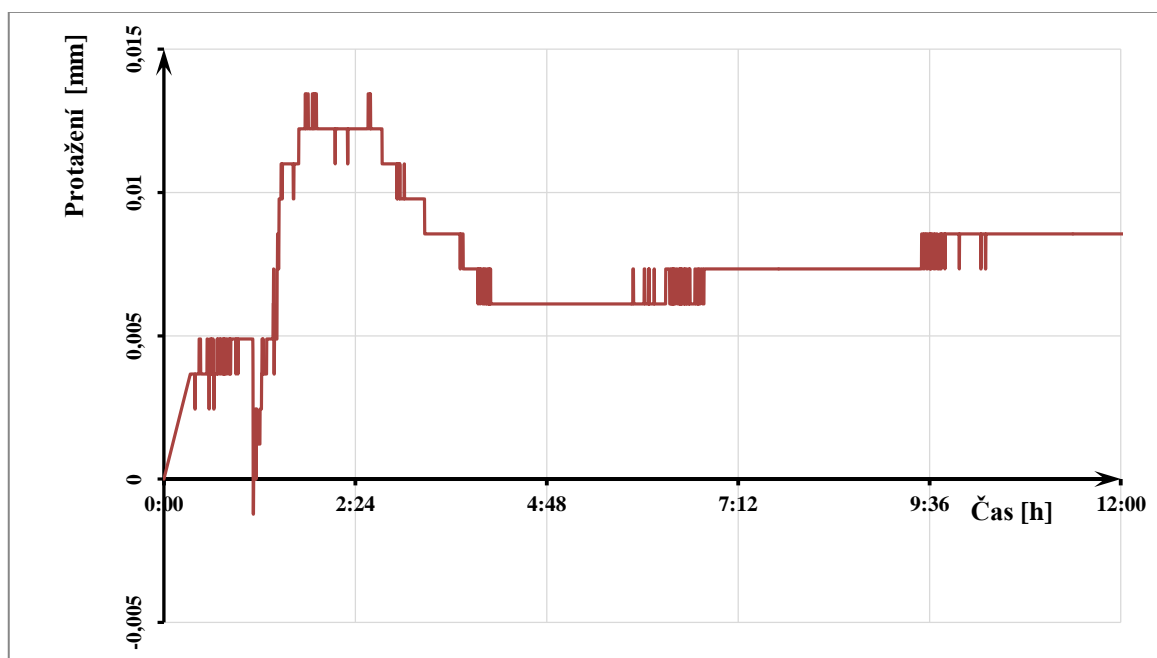


Graf 5.8 Chování ocelového drátu v závislosti na teplotě, měření 1



Graf 5.9 chování ocelového drátu v závislosti na teplotě, měření 2

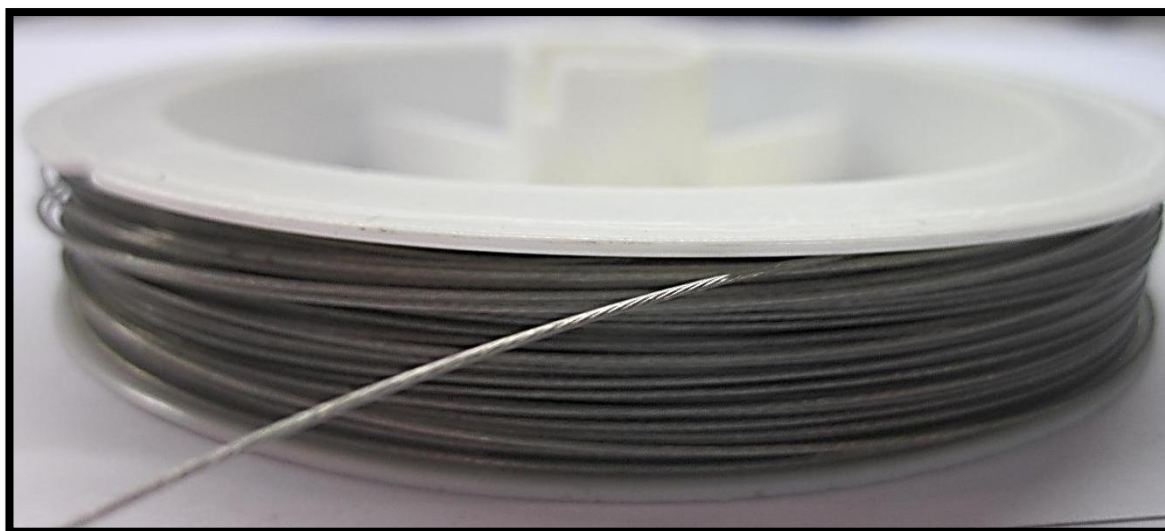
Vzhledem k tomu, že z prvního měření měl ocelový drát lepší výsledky než kterýkoliv z ostatních vzorků, byl vzorek využit i v měření druhém. Z grafů je patrné, že se ocelový drát chová velice podobně jako drát invarový a nedopouští se žádných deformačních excesů jako předchozí vzorky. Časový interval ustálení vertikální deformace drátu je srovnatelný s invarovým vzorkem, tedy přibližně půl hodiny. Teoreticky má invarový drát nulovou časovou hodnotu počátečního protažení a vzhledem k tomu, že jsou naměřené hodnoty velmi malé, lze je považovat za počáteční chybu indukčních snímačů.



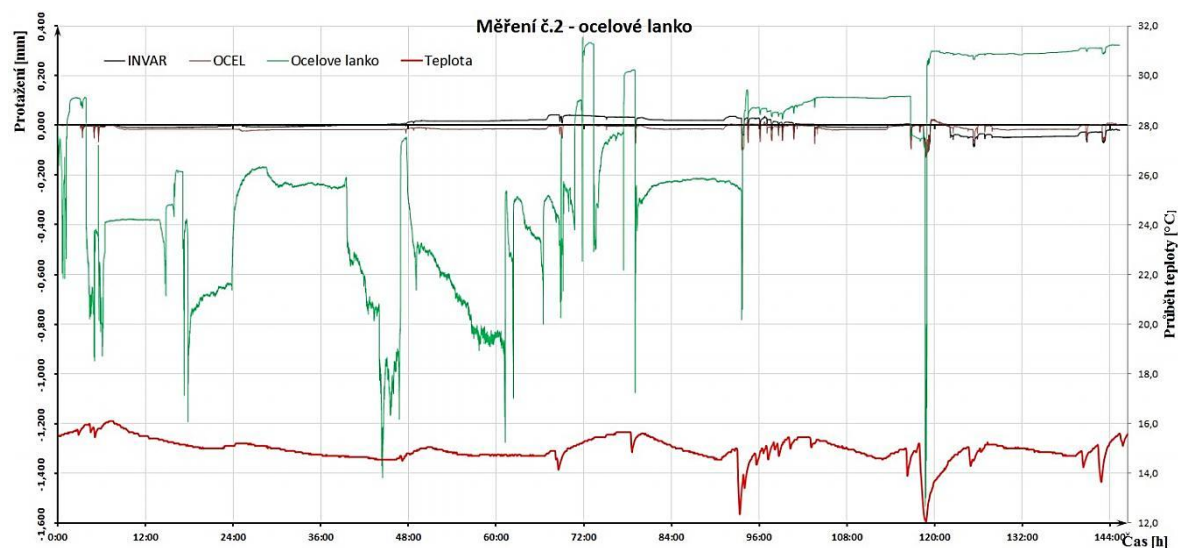
Graf 5.10 Ustálení počátečního protažení ocelového drátu

5.2.6 Obyčejné ocelové lanko

Měření č. 2 bylo zaměřeno pouze na kovové materiály. Pro experiment byl opatřen vzorek obyčejného ocelového lanka určeného k navlékání korálů a ručním pracím. Lanko má profil cca 0,5 mm a je zalito tenkou vrstvou plastu, zabráňující jeho rozpletení. Bohužel výrobce neuvádí materiálové složení ani mechanické parametry, byl tedy vzorek využit na základě zvědavosti a nevelkých předpokladů o jeho teplotní stálosti.



Obr. 5.9 Obyčejné ocelové lanko



Graf 5.11 Chování ocelového lanka v závislosti na teplotě

Ve srovnání s invarovým drátem je vzorek příliš pružný a teplotně nestálý. Při teplotním výkyvu 4°C byla deformace skoro 2 mm, což je pro závěsný drát nepřijatelné. Opět lze soudit, že při větších průměrech vzorku by byly výsledky více přijatelné. Tento konkrétní vzorek je však pro zatěžovací zkoušky nepoužitelný.

5.2.7 Rybářský návazec NIROFLEX

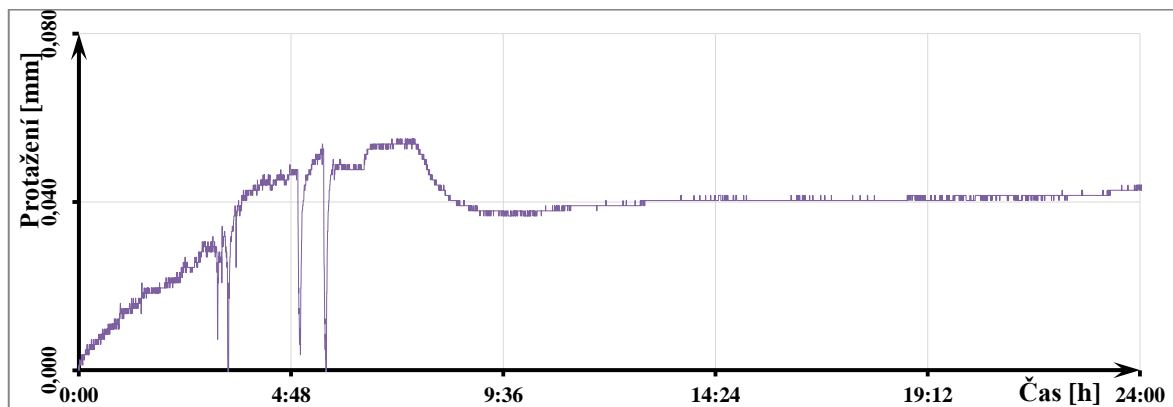
Použitý vzorek Niroflex je spletené ocelové lanko, složené ze sedmi nerezových drátů. Nosnost lanka je 15 Kg a jeho profil cca 0,6 mm, skladbu materiálu bohužel opět neznáme. Při rybaření se podobné druhy ocelových lanek využívají jako návazce na konec

rybářského vlasce při lovu dravých ryb. Díky ostrým zubům je dravec schopný běžný vlasec překousnout, požadavky na návazce jsou tedy odolnost proti střihu. Výrobce také uvádí, že návazec není prolitý žádným plastovým materiálem, aby mohly mezi sebou jednotlivé drátky prokluzovat a lanko bylo tak pružnější.

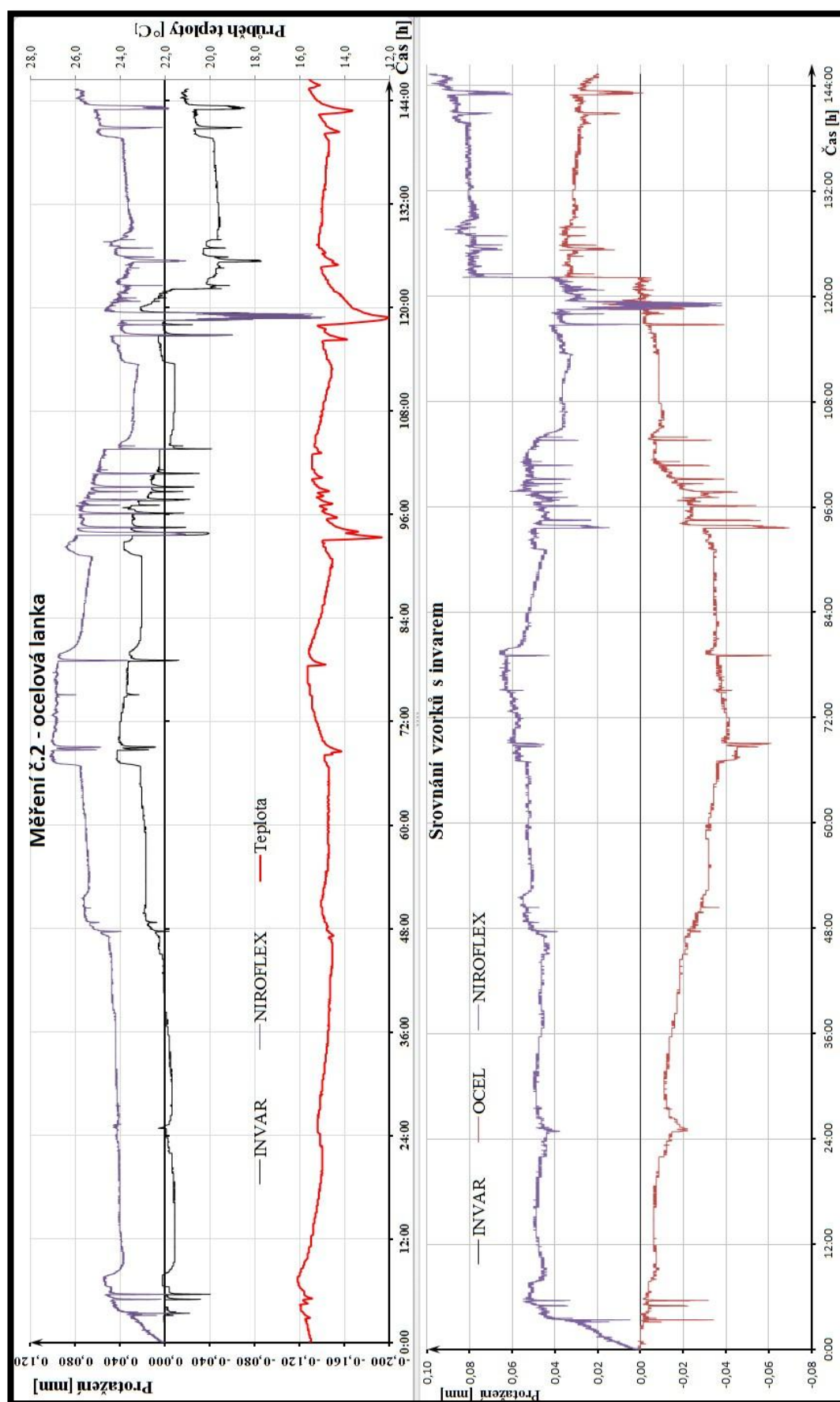


Obr. 5.10 Rybářský návazec NIROFLEX

Z grafu 5.13 je patrné, že vzorek niroflex se chová velice podobně jako invarový drát. Na teplotu reaguje stejně a netrpí žádným creepem, což je vzhledem k výrazně menší tloušťce ve srovnání s invarem zajímavé. Drát je tedy opravdu pevný a materiál stálý. Pokud vycházíme z toho, že invar je ideálně neměnný etalon, maximální protažení vzorku se pohybuje do 0,1 mm, hodnoty jsou to však relativní. Vyzkoušený vzorek vykazuje velmi malé protažení vzhledem ve srovnání s předchozími vzorky. Časový interval ustálení počáteční vertikální deformace se pohybuje okolo šesti hodin.



Graf 5.12 Ustálení počátečního protažení vzorku NIROFLEX



Graf 5.13 chování vzorku NIROFLEX v závislosti na teplotě

5.2.8 Rybářský návazec Target Line

Dalším zkoušeným vzorkem je rybářský návazec, označený jako Target Line. Profil je velmi podobný jako u předchozího vzorku (0,8 mm), jedná se o ocelové lanko spletené ze sedmi drátků, opatřené ochrannou plastovou vrstvou. Nosnost lanka je 25 Kg, což je

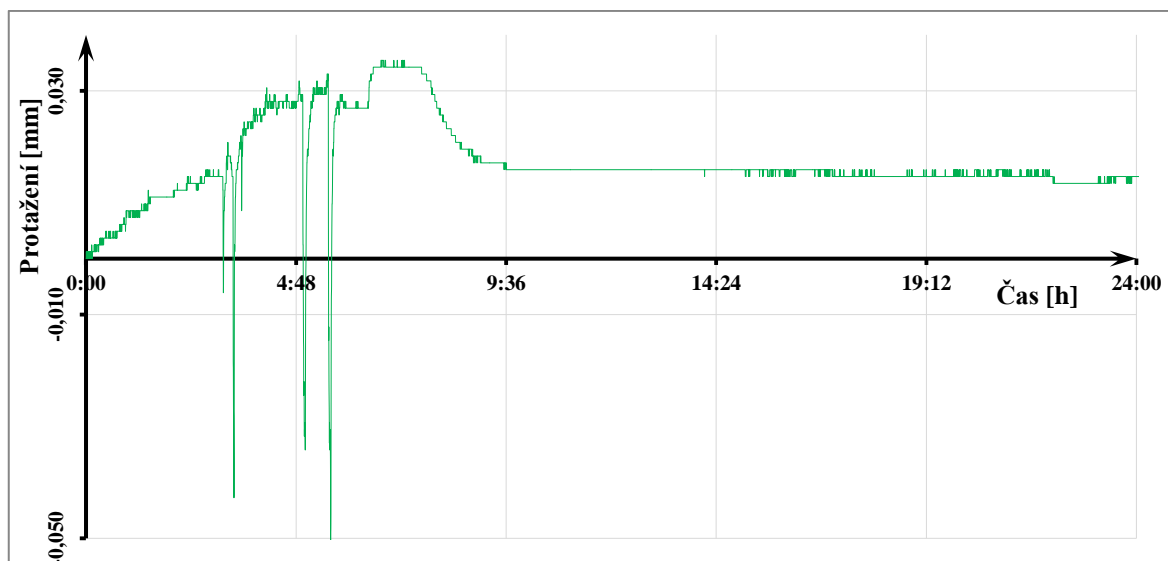
znát i na podstatně větším profilu než u předchozího vzorku.



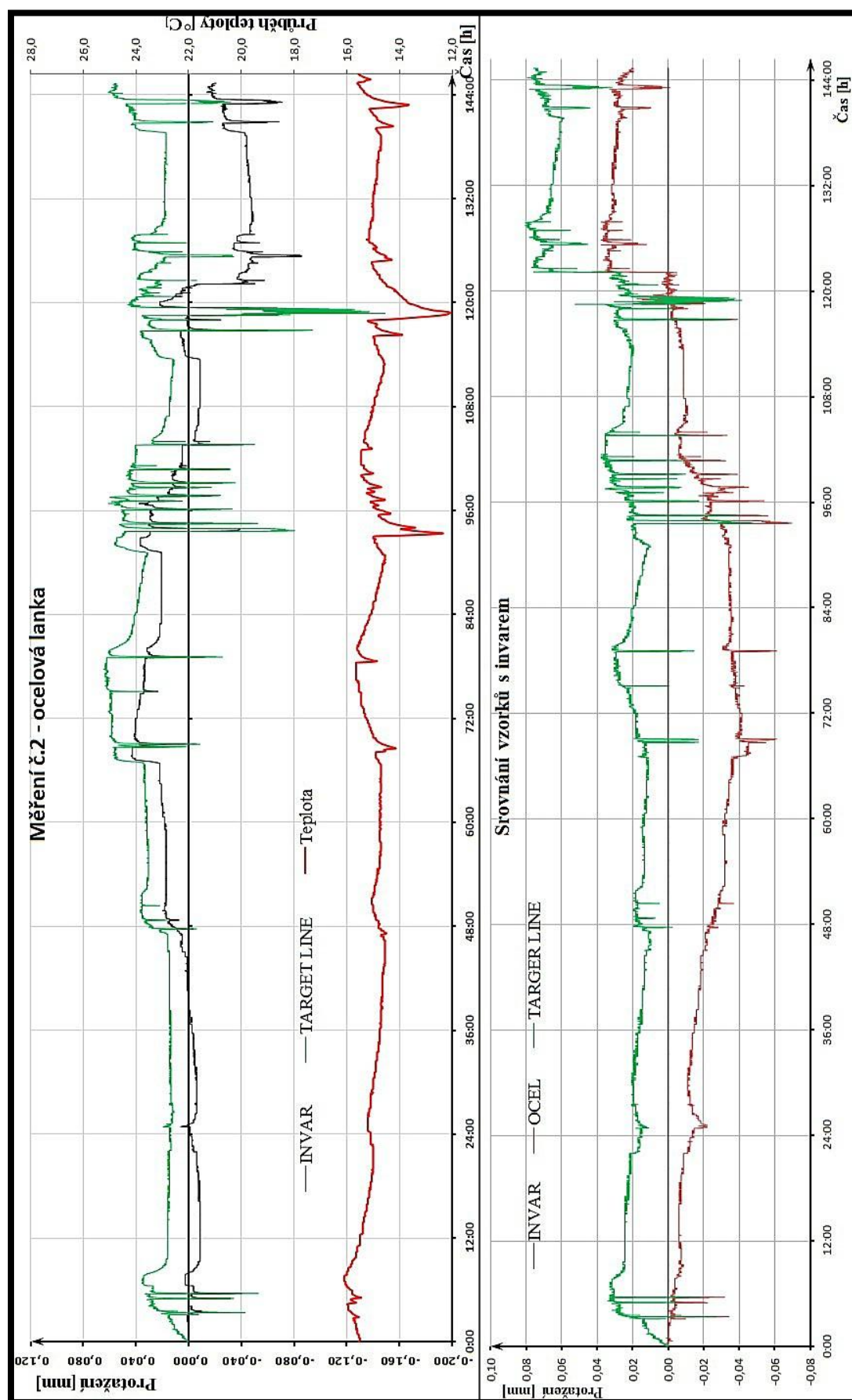
Obr. 5.11 Rybářský návazec Target Line

Vzorek se chová velice podobně jako předchozí Niroflex. Na výkyvy teploty reaguje větší délkovou změnou, ale jeho počáteční protažení po vyvěšení závaží je menší o cca 0,02mm. Výsledné vlastnosti jsou tedy ještě lepší než u vzorku předchozího, za předpokladu ustálené teploty. Ve srovnání s ocelovým drátem má vzorek Tar-

get Line velice podobné chování, zatímco se ocel smršťovala, tento vzorek se mírně protahoval, v přibližně stejných hodnotách (**graf 5.15**). Maximální protažení ve srovnání s invarem je 0,08 mm a vzorek se tak jeví jako vhodný. Bohužel na teplotní výkyvy reaguje podstatně více než ocel a invar. V rozsahu teplot, kterých bylo dosaženo při experimentu, jsou hodnoty protažení v pořádku, otázka je, jak by se vzorek choval při větším výkyvu a jakého protažení je schopen dosáhnout.



Graf 5.14 Ustálení počátečního protažení vzorku Target Line



Graf 5.15 chování vzorku Target Line v závislosti na teplotě

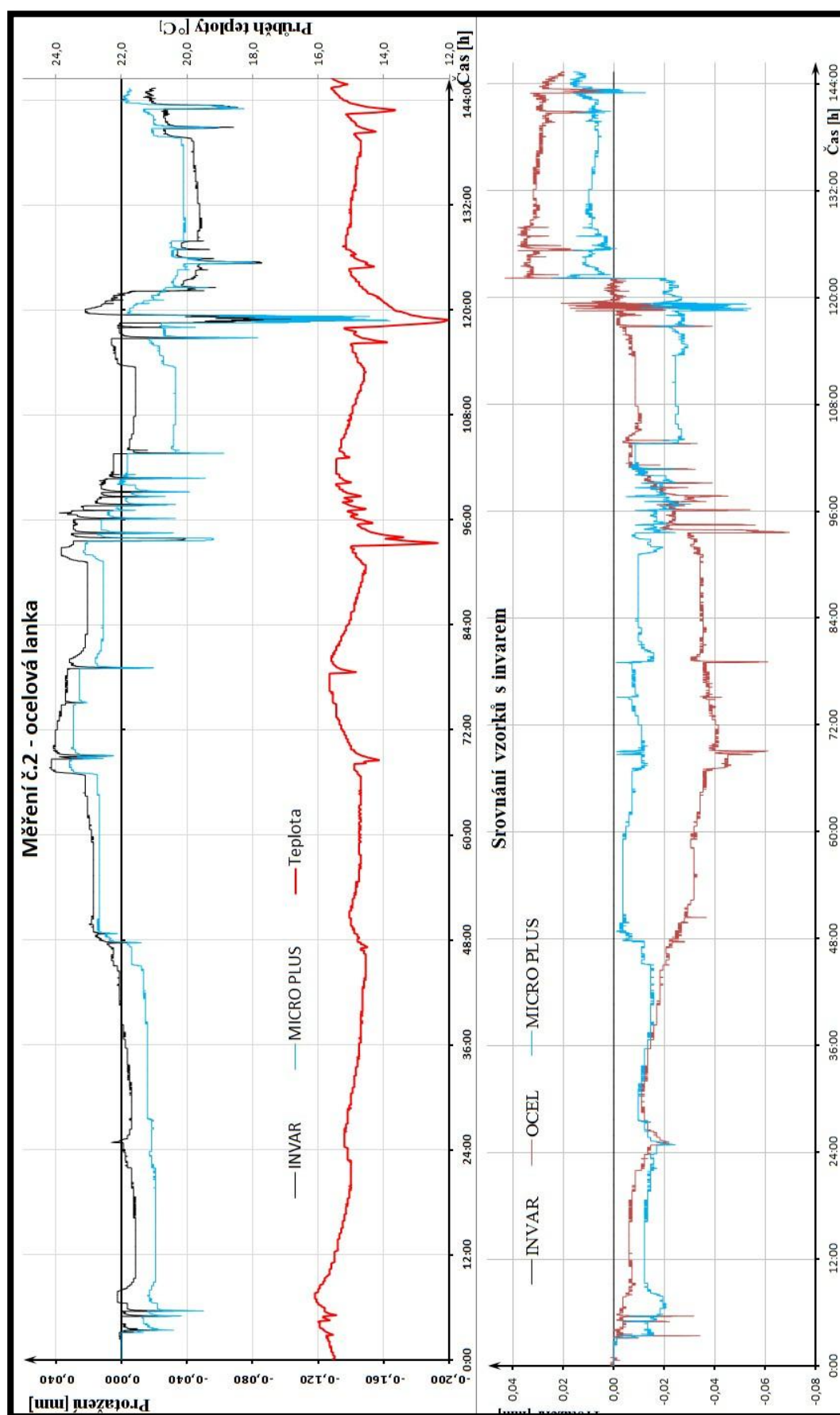
5.2.9 Rybářský návazec Micro Plus

Posledním zkoušeným vzorkem je rybářský návazec Micro Plus. Čeští prodejci uvádí, že jde o velmi tenké a vláčné ocelové lanko. Pro experiment bylo využito lanko nosnosti 13 Kg, z použitých rybářských návazců mělo tento jednoznačně nejmenší průměr 0,4 mm. Profil lanka tvoří 19 tenkých nerezových drátků zapletených do sebe, na rozdíl od předchozích vzorků bez jakékoliv vnější povrchové úpravy. Mezi rybáři patří tento návazec mezi oblíbené, pro svou pevnost a především snadnou manipulaci. Se vzorkem se dobře pracuje, je měkký, ohebný a i když nemá velkou tvarovou paměť, dobře se váže.

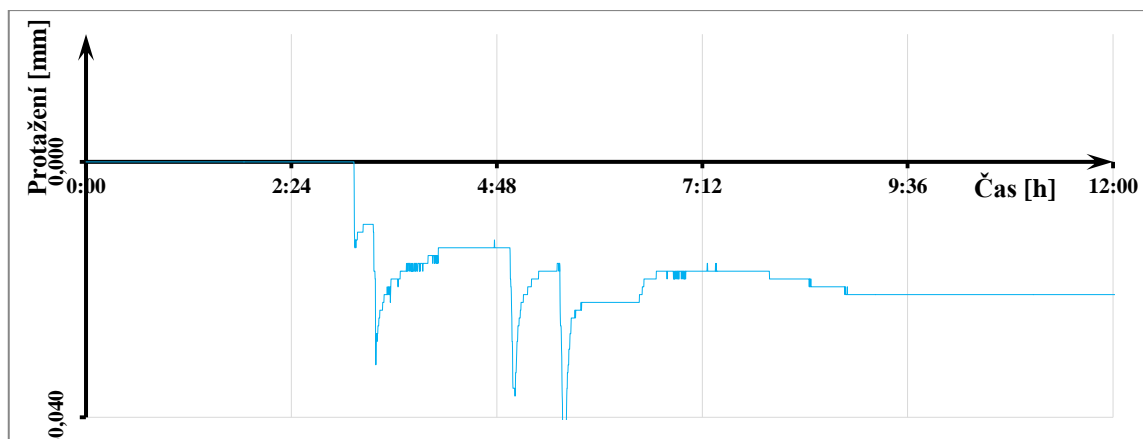


Obr. 5.12 Vzorek Micro Plus, schématické zakreslení profilu

Z grafického vyjádření na (graf 5.16) je patrné, že vzorek Micro plus vykazuje nejlepší vlastnosti ze všech použitých vzorků. V čase se chová velmi podobně jako invarový drát a při zvyšujících se teplotách má dokonce menší hodnoty protažení. Naopak s klesající teplotou se smršťuje více. V některých částech měření se dokonce jeví jako teplotně stálější než invar. Bohužel opět nelze opatřit technické listy a zjistit materiálové složení. V případě porovnání s běžným ocelovým drátem vykazuje vzorek lepší chování při výkyvu teplot a větší teplotní stálost. I navzdory svému malému profilu má vzorek vynikající vlastnosti, otázka je, čím jsou tyto vlastnosti podmíněny. K dobrým výsledkům může přispívat jednak materiálové složení, ale také složení lanka z více drátků. Pro zatěžovací zkoušky je tedy návazec Micro Plus vhodný, na českém trhu bohužel dostupný jen v 5 m svitcích.



Graf 5.16 Chování vzorku Micro Plus v závislosti na teplotě



Graf 5.17 Počáteční protažení vzorku Micro Plus

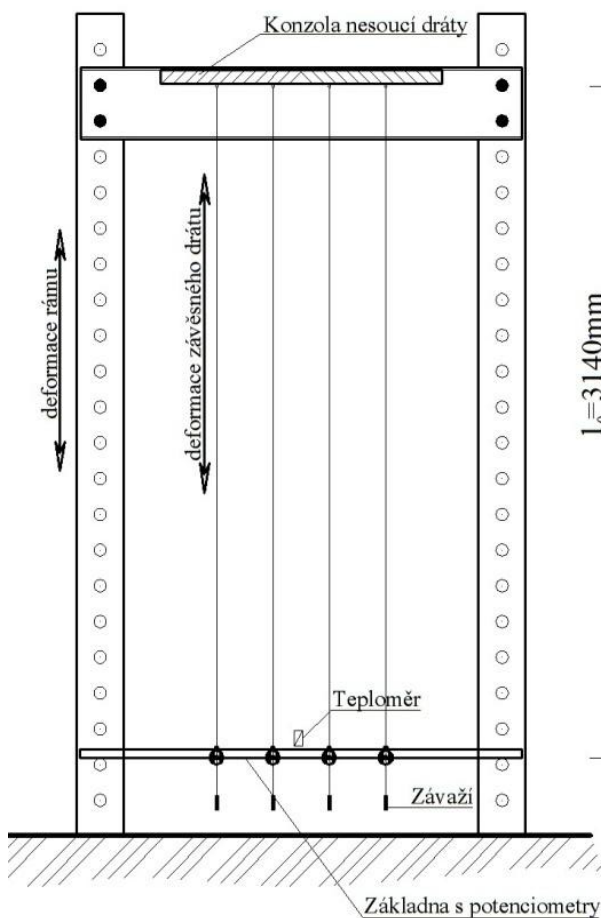
5.2.10 Faktor chyby experimentu

Před uvedením konkrétních hodnot a závěrů je třeba si uvědomit, jakým způsobem do experimentu zasahuje chyba, způsobená teplotní deformací rámu. Účelem přípravy měření bylo dosáhnout co možná nejmenší vzájemné změny polohy místa zavěšení a místa osazení potenciometrů. Vzhledem k tomu, že rám osazený dráty i potenciometry je ocelový,

do měření vstupuje jeho vlastní deformace, která může zkreslit a také zkresluje výsledky.

Pokud okolní teplota v laboratoři vzroste, díky teplotní roztažnosti vzroste i délka závěsného drátu. Teplota ale stejně působí i na rám, což způsobí jeho natažení a tím vyzdvihnutí drátu nahoru. Při ochlazení laboratoře se naopak drát zkrátí, ale konstrukce rámu se také zmenší, což způsobí snížení horní konzoly včetně drátů a naměření větší deformace. Teplotní deformace rámu má tedy jakýsi korelační účinek. Bohužel díky tomuto jevu nelze přesně změřit skutečné protažení či zkrácení drátu.

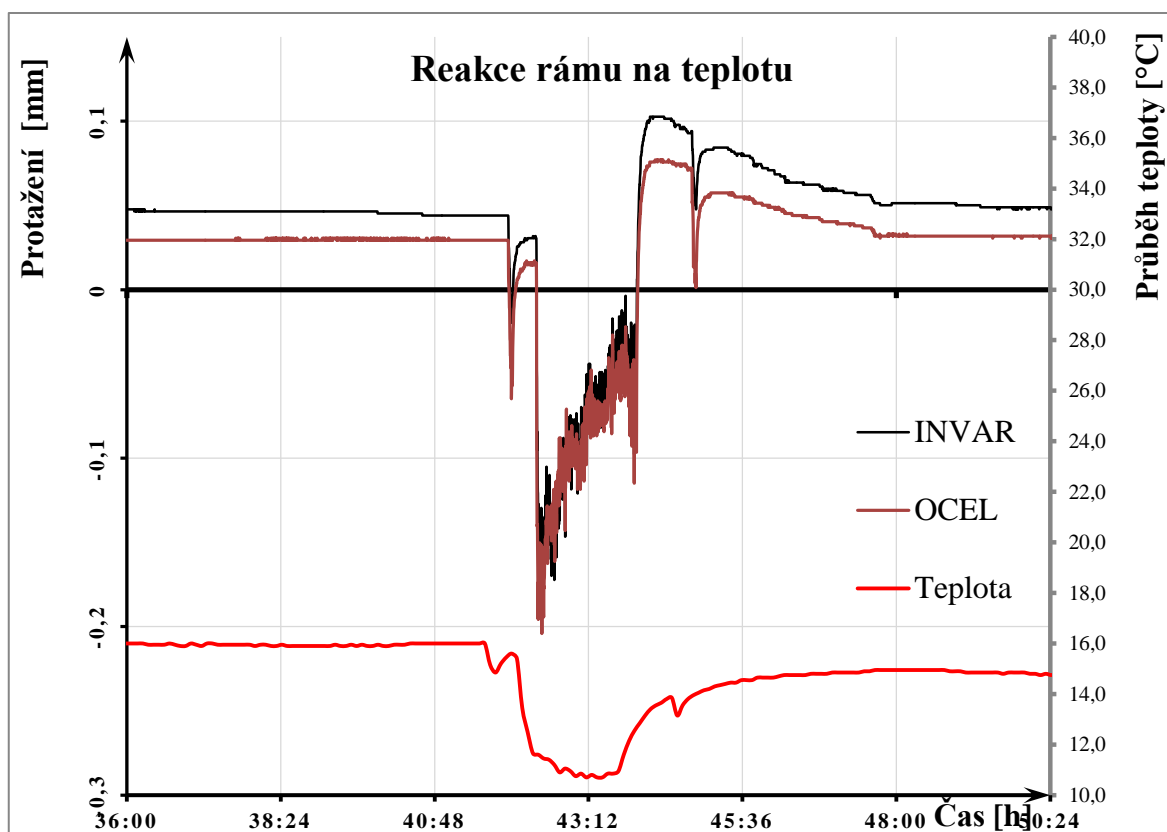
Teoreticky pokud by jeden ze zavěše-



Obr. 5.13 Schéma rámové konstrukce

ných drátů byl ze stejného materiálu jako rám, a v laboratoři došlo k časovému ustálení teploty a celkového prohřátí/prochlazení rámu, potenciometr by zaznamenal pouze náhlý výkyv teploty a po ustálení by byla naměřená deformace nulová. Díky teplotní roztažnosti by se tedy pohyb drátu a rámu vzájemně vynuloval.

Při experimentu v podstatě nedocházelo k ustálení teploty, a rám se tak nemohl celkově prohřát či zchladit. Konkrétní změnu délky rámu zde nelze vypočítat, protože konstrukce reagovala pouze na krátkodobý teplotní šok. Korelace naměřených hodnot je v tomto případě prakticky nemožná a aplikace teorie vzájemného pohybu drátů a rámu by vedla na výpočty vyšší matematiky.



Graf 5.18 Reakce rámu na teplotu

Graf 5.18 je výřezem průběhu deformací v závislosti na teplotě, získaných při měření č. 1. Zde je zřetelně vidět, že oba dráty (invarový a ocelový) mají konstantní hodnotu deformace při stálé teplotě. Teplota najednou klesne a oba dráty reagují rychlou deformací, tedy zkrácením. Vzhledem k tomu, že teplota po určitou dobu (cca hodinu) zůstává relativně konstantní, deformace drátů by měla také setrvat. Na rostoucí deformaci (v okolí 43. hodiny) je vidět, jak se rám vyrovnává se změnou teploty. Konstrukce rámu se smršťuje, zatímco deformace drátu zůstává konstantní, ale naměřené hodnoty deformace mají tedy rostoucí průběh. Když dojde k opětovnému ohřátí vzduchu v okolí rámu, defor-

mace drátů opět skokově vzroste. Vzroste však na větší hodnotu oproti původní, ustálené, i když teplota je o půl stupně menší než před výkyvem. Dráty se protáhly, ale rám zůstává smrštěný a přidává na hodnotě naměřené deformace. Rám začne reagovat zvětšováním objemu, vytahuje tak dráty nahoru a deformace klesá. Reakce rámu na teplotní skok 4°C trvá cca 4 hodiny do ustálení na původní hodnotu.

Pokud tedy bude využito při hodnocení drátů hodnot deformací ihned po změně teploty, chyba deformace rámu by do předpokladů měla zasáhnout pouze nepatrným způsobem.

5.2.11 Vyhodnocení experimentu

Předpokladem vyhodnocení obou zhotovených měření bylo vyjádření fyzikálních charakteristik použitých vzorků. Důležitým parametrem je teplotní roztažnost jednotlivých drátů, díky které lze jednoznačně určit jejich použitelnost pro zatěžovací zkoušky.

Podle postupu, uvedeného v kapitole 5.1.1, lze jednoduše dopočítat jednotlivé teplotní roztažnosti vzorků. Známe výchozí délku, změnu teplot, a pokud pomineme malou chybu způsobenou deformací rámu a nepřesností měřicího zařízení, máme i relativně přesné hodnoty délkových změn. Pokud budou parametry vzorků určeny v porovnání s invarovým drátem, lze předpokládat, že všechny dráty (včetně invarového) byly zatíženy stejnou chybou měřicí aparatury a deformací rámu.

Skutečnost je ovšem taková, že po vypočtení teplotní roztažnosti invarového drátu na základě naměřených hodnot délkových změn, dostaneme výsledky až 20x (!) větší než jsou uvedeny v tabulkách. Otázka je, čím jsou tyto extrémní hodnoty způsobeny. Tabulková hodnota teplotní roztažnosti invaru je $\alpha = 0,7\text{K}^{-1}$, lze ale předpokládat, že je to hodnota ingotu čistého invaru. Vzhledem k tomu že dráty se vyrábí protahováním, dochází ke změnám jejich fyzikálních vlastností, včetně tažnosti a teplotní roztažnosti, což může být příčinou velkých délkových změn, naměřených při experimentu. Přitom zajímavé je, že po výpočtu teplotní roztažnosti běžného ocelového drátu je hodnota přibližně odpovídající tabulkové.

V následující tabulce budou uvedeny teplotní roztažnosti jednotlivých vzorků, získány jednak výpočtem z naměřených hodnot protažení, a jednak odvozením od invarového drátu. V obou případech se jedná o hodnoty přibližné. Vhodnost použití jednotlivých vzorků se bude odvíjet od časového průběhu chování vzorku, tedy ustálení počátečních délkových změn, teplotní roztažnosti a reakci na výkyvy teplot.

Tab. 5.4 Vyhodnocení zkoušených vzorků

Vzorek	Hmotnost závaží [g]	α naměřená [$K^{-1} \times 10^{-6}$]	α odvozená [$K^{-1} \times 10^{-6}$]	Ustálení poč. protažení [h]	Použitelnost
Invar	495,2	12,55	0,7	0	běžná
TW - 42C	495,4	162,9	8,57	/	nepoužitelný
ST - 433	498,3	113,6	5,79	24	nepoužitelný
Nylon	497,3	33,32	1,69	48	nepoužitelný
WHIPLASH	496,3	35,13	1,79	30	nepoužitelný
Ocelový drát	499,7	19,42	1,08	0	běžná
Ocelové lanko	498,3	195,91	10,93	/	nepoužitelný
NIROFLEX	497,3	18,51	1,03	8	použitelný
Target Line	495,4	27,26	1,52	6	použitelný
Micro Plus	496,3	13,89	0,77	0	použitelný

Během experimentu se prokázalo, že jednoznačně nejvhodnějším zkoušeným vzorkem byl rybářský návazec Micro Plus. Počáteční protažení nevykázal vůbec žádné a s teplotou se choval přibližně stejně jako invarový drát. Bylo by vhodné najít důvody takovéto stálosti materiálu a podrobit vzorek rozsáhlejšímu měření.

6. Závěr

Jedním z účelů této práce bylo prozkoumat aktuálně využívané způsoby měření svislých deformací a ověřit jejich použitelnost při zatěžovacích zkouškách. Po průzkumu nabídky na českém trhu se jevily nejdostupnější přístroje laserové a optické. Jejich principy umožňují bezkontaktní měření vzdáleností a za předpokladu jejich osazení pod zkoušenou konstrukci by mohly usnadnit velké množství práce s přípravami zatěžovací zkoušky. Stejně jako u potenciometrického snímání dráhy a přesné optické nivelace i u těchto přístrojů roste chyba měření s rostoucí vzdáleností měřících bodů. Vzhledem k tomu, že jsou laserová zařízení určena k jiným účelům, důraz na přesnost měření není tak velký jak bychom si přáli. Chyba měření se pohybuje v řádech milimetrů. Bohužel pro zatěžovací zkoušky jsou hodnoty chyb nepřijatelné a měření by nemělo dostatečně vypovídající hodnotu. Lze předpokládat, že postupem času výrobci vyvinou dostatečně přesné přístroje pro účely zatěžovacích zkoušek, v současnosti však nejsou takové mechanismy na trhu dostupné. Bezkontaktní měření vzdáleností tak zatím může usnadnit práci například při terénních prohlídkách mostních konstrukcí.

Hlavním úkolem diplomové práce bylo najít vhodnou alternativu k často používanému ocelovému (ideálně invarovému) drátu při potenciometrickém měření průhybu mostu. Důvodem je, že invarový drát je nedostatkovým zbožím v technické praxi a v podstatě zmizel z českého trhu. Zatěžovací zkoušky mostních konstrukcí jsou relativně malým oborem činnosti a pro výrobce se nejeví lukrativní ekonomický sektor trhu, proto nejsou závažné dráty předmětem zájmů výrobců a odborná veřejnost trpí nedostatkem kvalitních materiálů.

Jako alternativy běžných závěsných drátů (ocel, invar) byly pro experiment opatřeny vzorky různých materiálů, průřezů a účelů použití. K ověření vlastností vzorků byly provedeny dvě měření (kap. 5) a graficky vyhodnoceny průběhy chování vzorků v závislosti na čase a teplotě. Z počátku byly očekávány dobré výsledky od aramidových vláken, které vykazují velmi vysoké pevnosti.

První měření bylo provedeno na třech nekovových materiálech spleteného charakteru, včetně opatřených aramidových vláken a jednom rybářském vlasci. Pro srovnání byl osazen invarový a obyčejný ocelový drát. Bohužel žádný z použitých vzorků neměl vyhovující vlastnosti a ve všech případech byl i obyčejný ocelový drát tvarově stálejší.

Pro měření druhé byly tři zkoumané vzorky z kovových materiálů spleteného charakteru, pořízené v rybářských obchodech a jedno běžné ocelové lanko. Sortiment rybářských

návazců na dravé ryby se vyznačuje velkou pevností a odolností proti stříhu. Na českém i světovém trhu jsou tyto návazce běžně dostupné, rozličných typů i výrobců. Oproti prvnímu měření byly zde zjištěny výrazně lepší vlastnosti materiálů a chování vzorků bylo obdobné jako u invarového a ocelového drátu. Jeden ze vzorků vyráběný pod názvem Micro Plus měl místy dokonce vhodnější průběh protahování než ocelový drát, netrpěl žádným vlivem creepu a po vyvěšení závaží nedošlo k počátečnímu protažení drátu. Bohužel nejsou k dispozici technické listy a nelze jednoznačně potvrdit, čím bylo takové chování drátu podmíněno. Vzorek Micro Plus je pro účely zatěžovacích zkoušek vhodný a bylo by dobré, podrobit jej dalším experimentům.

Experimentem bylo ověřeno celkem osm druhů závěsných drátů, z toho jeden se projevil jako vhodná alternativa ocelového a invarového drátu. Výsledky měření tak mohou pomoci odborné veřejnosti nedostupnosti invarového drátu v případě jeho vyčerpání, či v dalším hledání alternativ.

7. Použitá literatura

- [1] ČSN 73 6209. ZATĚŽOVACÍ ZKOUŠKY MOSTŮ. Praha: Kloknerův ústav ČVUT, 1995.
- [2] ČSN 73 2030. ZATĚŽOVACÍ ZKOUŠKY STAVEBNÍCH KONSTRUKCÍ. Praha: Technický a zkušební ústav stavební, 1994.
- [3] ČSN 73 6221. Prohlídky mostů pozemních komunikací. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [4] STRÁSKÝ, Jiří. BETONOVÉ MOSTY. Praha: Český svaz stavebních inženýrů, 2001. ISBN 80-86426-05-X.
- [5] STANĚK, Vlastimil, Gabriela HOSTINOVÁ a Alojz KOPÁČIK. Geodézia v stavebníctve. Bratislava: Jaga group, 2007, 110 s. ISBN 978-80-8076-048-9.
- [6] HALLIDAY, David. Fyzika: Vysokoškolská učebnice obecné fyziky. 1. vyd. Brno/Praha: VUTIUM/PROMETHEUS, 2000, 1198 s. ISBN 80-214-1869-9.
- [7] SCHMID, Pavel. Zkušebnictví a technologie: Modul BI02-M02, Stavební zkušebnictví., 2004. 48 s.
- [8] HVOZDENSKÝ, P. Kvantifikace a zvyšování přesnosti měření průhybu mostů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství 2008, 72 s. z toho přílohy 5 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jiří Perníkář, CSc.
- [9] KOŘISTKA, P. Měření polohy indukčními snímači. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 41 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Petr Huták, Ph.D.
- [10] Zatěžovací zkoušky mostů. KLOKNERŮV ÚSTAV ČVUT [online]. 2010 [cit. 2012-10-24]. Dostupné z: <http://www.klok.cvut.cz/cs/referencni-projekty/zatezovaci-zkousky-mostu.html>
- [11] Eliminace dešťového stínu pod mosty. ČASOPIS STAVEBNICTVÍ [online]. 2009 [cit. 2012-10-24]. Dostupné z: <http://www.casopisstavebnictvi.cz/clanek.php?detail=717>
- [12] TATRA 815 S3 26 208 6x6.2. In: VÁLKA.CZ [online]. 2008 [cit. 2012-10-29]. Dostupné z: <http://forum.valka.cz/viewtopic.php/t/16298>
- [13] Nusle bridge, heavy with dark legacy. In: Aktuálně.cz [online]. 2006 [cit. 2012-10-29]. Dostupné z: <http://aktualne.centrum.cz/czechnews/fotogalerie/foto/124941/?cid=522064>

- [14] Sfalassa Bridge. In: Highestbridges.com [online]. 2010 [cit. 2012-10-29]. Dostupné z: http://highestbridges.com/wiki/index.php?title=Sfalassa_Bridge
- [15] Reinforced Concrete T-girder Bridges. In: John Monash: Engineering enterprise prior to WW1 [online]. 2002 [cit. 2012-10-29]. Dostupné z: http://home.vicnet.net.au/~aholgate/jm/girderpics/stkilda_test.html
- [16] Reference - Poděbrady. In: Mostní a silniční [online]. 2010 [cit. 2012-11-05]. Dostupné z: <http://www.mostni-silnicni.cz/cs/detail-reference/2010-podebrady-most-pres-labe>
- [17] Nový most v Karlových Varech. In: Týdení Českých drah - ŽELEZNIČÁŘ [online]. 2007 [cit. 2012-11-05]. Dostupné z: http://www.cd.cz/old/TCD2005/5_42most.htm
- [18] Rekonstrukce mostu v km 151,055 v trati Plzeň - Česká Kubice. In: Mosty.cz [online]. 2007 [cit. 2012-11-05]. Dostupné z: <http://www.mosty.cz/index.asp?module=ActiveWeb&page=WebPage&DocumentID=2378>
- [19] Bridge and platform test. In: WaterWeights Scandinavia AS [online]. 2008 [cit. 2012-11-05]. Dostupné z: <http://www.waterweights.no/water-weights/bridges-and-platforms/>
- [20] Structural health monitoring of continuous prestressed concrete bridges using ambient thermal responses. In: Engineering Structures [online]. 2012 [cit. 2012-11-05]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029612000594>
- [21] Load capability tested on Chaotianmen Bridge. In: CQNEWS [online]. 2009 [cit. 2012-11-05]. Dostupné z: http://english.cqnews.net/cqnews/200904/t20090414_3168106.htm
- [22] Zatěžkávací zkoušky mostních objektů. In: PROFIGEO s.r.o. [online]. 2006 [cit. 2012-11-05]. Dostupné z: <http://www.profigeo.info/reference-ostatni>
- [23] Nano-machinery.com [online]. [200?] [cit. 2011-04-21]. Measurement instrument - Vernier caliper. Dostupné z WWW: <www.nano-machinery.com/catalog>.
- [24] ZipLevel Pro 35. In: E-meridla.cz [online]. 2012 [cit. 2012-11-28]. Dostupné z: <http://www.e-meridla.cz/digitalni-hadicove-vodovahy/ziplevel-pro-35-digitalni-hadicova-vodovaha-laserliner-p-157579.html?cPath=205372>
- [25] Spider - 8. In: SENSOR, Ana Sayfa [online]. 2009 [cit. 2012-11-28]. Dostupné z: <http://www.sensor-hbm.com/html/spider8.html>

- [26] Mechanical Potentiometers. In: Scheme-it [online]. 2011 [cit. 2012-11-29]. Dostupné z: <http://www.eeweb.com/electronics-quiz/mechanical-potentiometers>
- [27] Optoelektrické snímače vzdálenosti a polohy. In: Automa [online]. 2011 [cit. 2012-11-29]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=28748
- [28] Hadicová vodováha. In: Profesionální vybavení pro servis a dílnu, zahradní technika, kompresory [online]. 2012 [cit. 2012-11-30]. Dostupné z: <http://www.dovavanik.cz/stavebnictvi-eSHOP-.html?xmlid=474627>
- [29] Dálkoměr Leica DISTO D3a BT. In: EELTY [online]. 2012 [cit. 2012-11-30]. Dostupné z: <http://www.merici-opticke-pristroje.cz/dalkomer-leica-disto-d3a-bt>
- [30] Sklonoměr HORIZONT 600mm. In: Bohemia trade [online]. 2012 [cit. 2012-11-30]. Dostupné z: <http://www.bohemiatrader.cz/vodovahy/44046440-sklonomer-horizont-600mm-3838853112192.html>
- [31] Příběh nylonu: Materiál, který zkrátil ženské nohy a pomstil se Japoncům. In: IHNED.CZ [online]. 2012 [cit. 2012-12-06]. Dostupné z: <http://life.ihned.cz/moda/c1-54870050-pribeh-nylonu-material-ktery-zkrasli-zenske-nohy-a-pomstil-se-japoncum#fotogalerie-gf203486-5-1545180>
- [32] Dyneema. In: Wikipedie [online]. 2012 [cit. 2012-12-06]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Dyneema>
- [33] BERKLEY WHIPLASH CRYSTAL. In: Alderney Angling [online]. 2012 [cit. 2012-12-06]. Dostupné z: http://www.alderneyangling.com/index.php?route=product/product&product_id=498

8. Příloha 1 – grafický výstup měření č. 1



9. Příloha 2 – grafický výstup měření č. 2

